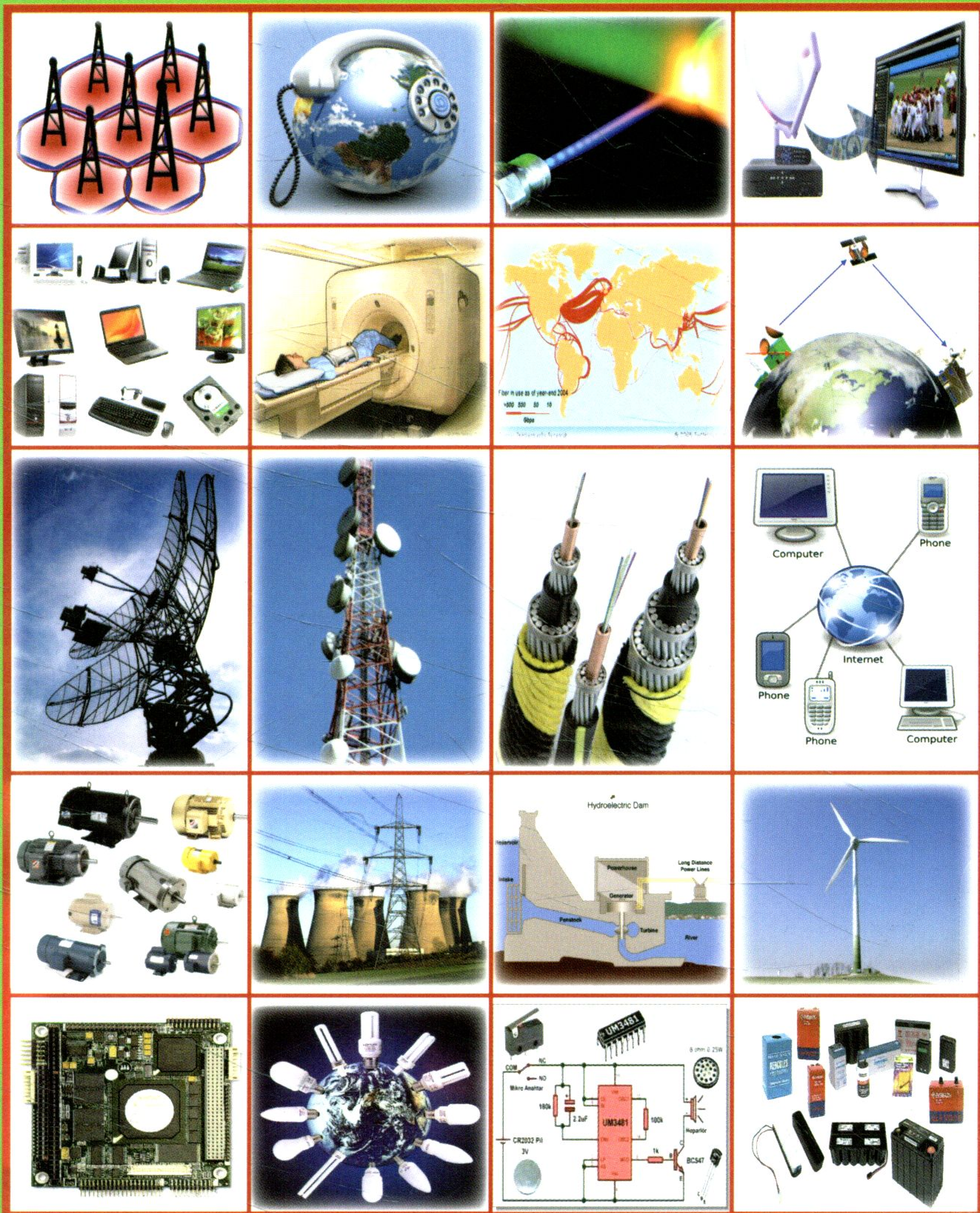
مدخل
إلى الهندسة الكهربائية



الأستاذ الدكتور منصور أبوشريعة العبادي

مدخل إلى الهندسة الكهربائية

الأستاذ الدكتور منصور أبوشريعة العبادي
قسم الهندسة الكهربائية
جامعة العلوم والتكنولوجيا الأردنية

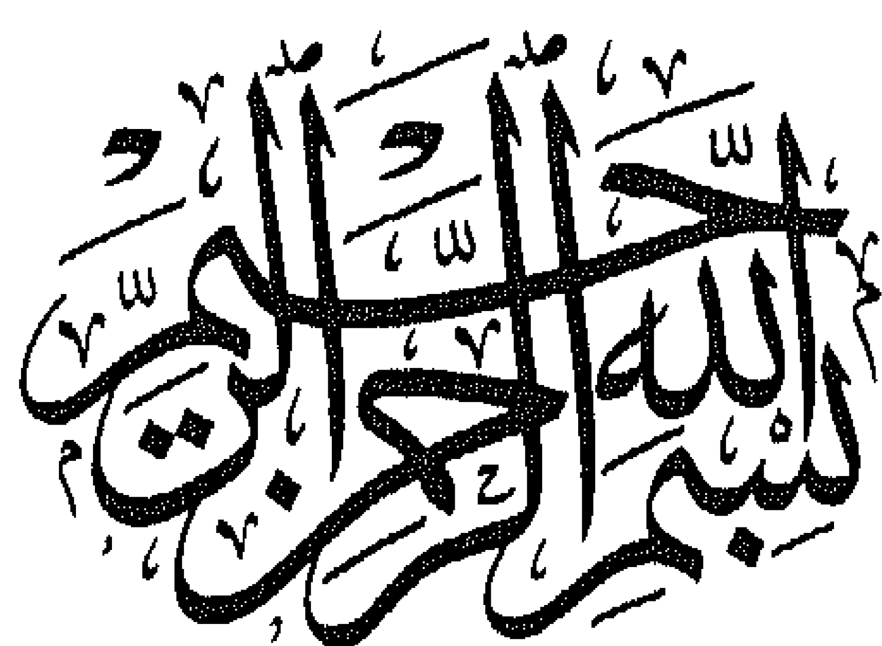
الطَّبعَة الأولى

١٤٣٢ هـ - ٢٠١١ م

المملكة الأردنية الهاشمية
رقم الإيداع لدى دائرة
المكتبة الوطنية
(٢٠١١/١/٤٠٦)

٦٢١,٣١
العبادي، منصور أبو شريعة
مدخل الى الهندسة الكهربائية / منصور أبو شريعة العبادي.- عمان
للمؤلف، ٢٠١١
(   ) ص.
ر.أ.: ٢٠١١/١/٤٠٦
الوصفات : /الهندسة الكهربائية//

❖ أعدت دائرة المكتبة الوطنية بيانات الفهرسة والتصنيف الأولية
❖ يتحمل المؤلف كامل المسؤولية القانونية عن محتوى مصنفة ولا يعبر هذا المصنف عن رأي دائرة المكتبة الوطنية أو أي جهة حكومية أخرى.



المحتـــويـــــات

المقدمة

إن من أعجب وأعظم الأبواب التي فتحها الله على البشر في القرنين الماضيين هو باب الطاقة الكهربائية حيث أن هذا الباب قد فتح أبوابا كثيرة ما كان لها أن تفتح بدونه. فبدون الكهرباء ما كان للمصابيح الكهربائية أن تظهر حيث مكنت هذه المصابيح البشر من إضاءة بيوتهم ومكاتبهم ومصانعهم وشوارعهم من خلال كبسة زر. لقد أراحت هذه المصابيح البشر من عناء عمليات تجهيز وإشعال وإطفاء مصابيح الشمع أو الزيت أو الكاز والغاز والتي لا تضيء إلا أماكن محددة وبدرجات إضاءة متدنية مع ما يترتب على إشعال هذه المصابيح من تلوث لأجواء البيوت أو خطر احتراق أثاثها. وللقارئ أن يتخيل مدى الجهد الذي ستبذله ربات البيوت في تجهيز عدد كاف من مصابيح الكاز أو الغاز لوضعها في مرافق بيت يتكون من عدة غرف وما يتبعها من غرف الضيوف والجلوس والمطابخ والحمامات. وبدون الكهرباء ما كان للمحركات الكهربائية أن تظهر حيث مكنت هذه المحركات البشر من استخدام الثلاجات والغسالات والمكيفات والمراوح ومضخات الماء في داخل المنازل وبدون ضوضاء تذكر. وللقارئ أن يتخيل في حال غياب الكهرباء الآثار المترتبة على استخدام محركات الديزل أو البنزين لتشغيل مثل هذه الأجهزة بدلا من المحركات الكهربائية. وبدون الكهرباء ما كان للتلفزيونات والراديوات والمسجلات والتلفونات والحواسيب أن تظهر أبدا حيث لا يمكن لمثل هذه الأجهزة أن تعمل بدون الكهرباء. وبدون الكهرباء ما كان للمصانع الحديثة أن تظهر والتي تستخدم محركات كهربائية بمختلف الأحجام والأنواع والتي يتم التحكم بها بكل سهولة من غرف التحكم. وبدون الكهرباء ما كان للسيارات والمركبات أن تشتغل إلا من خلال تدوير محركاتها يدويا أو من خلال دفعها لمسافات معينة. وبدون الكهرباء ما كان لكثير من الأجهزة والمعدات أن تظهر كالرادارات والليزرات والأجهزة الطبية وغيرها من الأجهزة الكهربائية التي لا يمكن لها أن تعمل بغير الطاقة الكهربائية والتي بغيابها تختفي هذه التطبيقات التي اعتاد الإنسان على استخدامها ابتداء من بداية القرن العشرين. ولكي تدرك بسهولة أهمية الكهرباء في حياتنا المعاصرة فما علينا إلا أن نتخيل ما سيكون عليه حال الحياة فيما لو انقطعت الكهرباء بكل أشكالها وبدون رجعة عن مستخدميها حيث ستتعطل أنظمة الإنارة وجميع الأجهزة المنزلية من ثلاجات وغسالات ومراوح ومكيفات وخلاطات وهواتف وراديوهات وتلفزيونات ومسجلات وحواسيب وتتوقف معظم المصانع الحديثة عن الإنتاج وتتعطل أجهزة المستشفيات والبنوك وتتوقف حركة الطائرات المركبات والآليات وتتوقف مراكز الأبحاث والمختبرات عن العمل. إن انقطاع الكهرباء لساعات معدودة عن المنازل والمكاتب والمصانع والمستشفيات والمدارس والجامعات يترتب عليه مشاكل كثيرة يدركها جميع الناس اليوم.

لقد بدأ عصر الكهرباء باختراع البطارية كمصدر مستمر للطاقة الكهربائية على يد الفيزيائي الإيطالي اليساندرو فولتا وذلك في عام 1800م. وفي مدة لا تتجاوز الثلاثين عاما تمكن علماء أفذاذ كأمثال أمبير وفارادي وأوم وأورستد لا يحمل أكثرهم شهادات علمية عالية من دراسة الظاهرة الكهربائية دراسة مستفيضة في غياب الأجهزة والمعدات التي نملكها اليوم واكتشاف معظم القوانين التي تحكم هذه الظاهرة. وعلى الرغم من انخفاض كمية الطاقة الكهربائية التي تنتجها البطارية إلا أنه تم استخدامها في أعظم تطبيق عرفته البشرية وهو نقل المعلومات بسرعة الضوء بين الناس باستخدام التلغراف وذلك بعد أقل من أربعين عاما من اختراعها. وعلى الرغم من أن مبادئ عمل المولد الكهربائي وكذلك المحرك الكهربائي قد تم

اكتشافها في عام 1831م على يد العالم الإنكليزي الشهير ميشيل فارادي إلا أن تصنيع مولد كهربائي عملي يقوم بتوليد كميات كبيرة من الطاقة الكهربائية من الطاقة الحركية قد تأخر ما يقرب من أربعين عاما بسبب عدم توفر التكنولوجيا اللازمة لتصنيع مثل هذه المولدات. ومع ظهور مثل هذه المولدات في عام 1875م ظهرت استخدامات جديدة للكهرباء كان أولها إضاءة المنازل من خلال استخدام المصابيح الكهربائية وأما الاستخدام الثاني فهو لتشغيل المحركات الكهربائية والتي استخدمت في تطبيقات لا حصر لها كما في الثلاجات والغسالات والمراوح. وقد كانت شلالات المياه أول مصدر للطاقة الحركية لتشغيل المولدات الكهربائية ومع ظهور مختلف أنواع المحركات الميكانيكية التي تعمل على الوقود الأحفوري كالفحم والغاز والبترول في بداية القرن العشرين بدأ باستخدامها لتشغيل المولدات الكهربائية.

وفي عام 1876م تمكن الأمريكي جراهام بل من تصنيع أول جهاز هاتف عملي وأسس في عام 1877م أول شركة للخدمة الهاتفية (شركة بل للهواتف) التي قامت ببناء أول شبكة هاتفية في إحدى المدن الأمريكية بسعة 21 خط. وفي عام 1887م تم اكتشاف الموجات الكهرومغناطيسية على يد عالم الفيزياء الألماني هينرتش هيرتز والتي يعود الفضل في التنبؤ بوجودها لعالم الفيزياء الاسكتلندي الشهير جيمس كلارك ماكسويل. فلقد تمكن ماكسويل في عام 1860م من صياغة جميع القوانين المتعلقة بالكهربائية والمغناطيسية وتفاعلهما مع بعضهما البعض في أربع معادلات تفاضلية واستطاع من خلال حل هذه المعادلات التنبؤ بوجود ما يسمى بالموجات الكهرومغناطيسية. لقد سهلت الموجات الكهرومغناطيسية عملية نقل مختلف أنواع المعلومات بطريقة لاسلكية إلى أي مكان على سطح هذه الأرض بل وتعداها إلى الفضاء الخارجي . فبعد سنوات قليلة من اكتشاف وتوليد هذه الموجات بدأ ظهور كثير من الأنظمة اللاسلكية فظهر التلغراف اللاسلكي في عام 1900م ومن ثم البث الراديوي في عام 1918م والبث التلفزيوني في عام 1935م.

وفي عام 1904م تم اختراع أول عنصر فعال في عالم الإلكترونيات وهو الصمام الثنائي (diode) على يد عالم الفيزياء الإنجليزي جون فليمنغ وأما الاختراع الأكثر أهمية في عالم الإلكترونيات فقد تحقق على يد المهندس الكهربائي والمخترع الأمريكي دي فورست وذلك في عام 1906م عندما تمكن من إضافة شبكة معدنية تقع بين المهبط والمصعد ليحول بذلك الصمام الثنائي إلى الصمام الثلاثي (triode). واستخدمت الصمامات الإلكترونية في تطبيقات بالغة الأهمية كتوليد وتضخيم الإشارات الكهربائية مما مكن من بناء أنظمة اتصالات فعالة لنقل المعلومات المختلفة كما في أنظمة التلغراف والتلكس والهاتف وكذلك أنظمة البث الراديوي والتلفزيوني. واستخدمت الصمامات كذلك في بناء الدوائر المنطقية التي مكنت من بناء أول حاسوب إلكتروني رقمي وذلك في عام 1945م. ومع اختراع الترانزستور في عام 1947م كبديل للصمام الإلكتروني الذي كان كبير الحجم ويستهلك كميات كبيرة من الطاقة أصبح بالإمكان بناء أنظمة إلكترونية معقدة بأحجام صغيرة وباستهلاك قليل للطاقة الكهربائية. وباختراع الدوائر المتكاملة في عام 1960م تم مزيد من التقليص في أحجام الأجهزة الإلكترونية والتخفيض في كمية الطاقة المستهلكة مما أدى إلى ظهور أنظمة إلكترونية أكثر تعقيدا كالتلفزيونات الملونة والأقمار الصناعية والحواسيب الجبارة والهواتف المتنقلة والحاسبات اليدوية وأجهزة التحكم الذكية والمعدات الطبية والرادارات وغير ذلك من الأجهزة والمعدات التي بين يدينا الآن.

لقد كان الدافع الرئيسي وراء تأليف هذا الكتاب هو اكتشافي من خلال تدريسي لمساقات مختلفة في قسم الهندسة الكهربائية في جامعات أردنية مختلفة أن خريجي الهندسة الكهربائية يجهلون كثيرا من المعلومات الأساسية في مختلف تخصصات الهندسة الكهربائية على الرغم من أنهم يدرسون ما يقرب من أربعين مساقا

في هذا التخصص. وعلى الرغم من إدراكي أن تخصص الهندسة الكهربائية كما هو الحال مع تخصصات الهندسة الأخرى لا يمكن لأحد أن يحيط علما بجميع تفصيلاته إلا أنه من المستهجن أن تجد مهندسا كهربائيا وقد تخصص في أنظمة الاتصالات يجهل أساسيات الهوائيات أو أساسيات الرادار أو غير ذلك من الأنظمة بحجة أنه لم يدرس المساق المطلوب حيث أنه مساق اختياري. أما الدافع الثاني وراء تأليف هذا الكتاب هو فقر المكتبة العربية لكتب باللغة العربية تقوم على الأقل بتعريف القراء العرب بأساسيات مختلف التخصصات العلمية. وهذا الكتاب قد كتب بطريقة بحيث يستفيد منه قراء بمستويات مختلفة من التعليم وعلى مختلف تخصصاتهم فالتمهيد الموجود في بداية كل فصل من فصول هذا الكتاب يعطي تعريفا عاما عن مختلف تخصصات الهندسة الكهربائية ويمكن لأي قارئ أن يستفيد منه. وأما المستوى الثاني من القراء فهم المختصون في غير الهندسة الكهربائية وخاصة المهندسون منهم والذين في الغالب يدرسون مساقا واحدا أو مساقين في أساسيات الهندسة الكهربائية وسيساعدهم هذا الكتاب في التعرف على مختلف تخصصات الهندسة الكهربائية. فعلى سبيل المثال فإن المساق الذي يعطى للمهندسين غير الكهربائيين يغطي بعض أساسيات الدوائر الكهربائية والإلكترونية ولذا فقد يكونوا بحاجة ماسة لمعرفة أساسيات بعض المساقات الأخرى كأجهزة القياس الكهربائية والاتصالات والتحكم والمولدات والمحركات الكهربائية. أما المهندسون الكهربائيون فإن هذا الكتاب سيساعدهم على التعرف على كثير من جوانب الهندسة الكهربائية التي لم يتمكنوا من دراستها من خلال المساقات الدراسية فالمساقات المتقدمة في تخصصات الاتصالات والإلكترونيات والحاسوب والقوى والآلات لا يدرسها إلا من تخصص في أحد هذه التخصصات. بل إن المهندس الكهربائي الذي تخصص في أحد هذه التخصصات قد لا يتمكن من دراسة بعض المساقات المتقدمة في تخصصه فالمختصون في هندسة الاتصالات قد لا يتمكنوا من دراسة مساق عن الأقمار الصناعية أو عن الرادار أو عن الليزر. وقد يساعد هذه الكتاب مدرسي الهندسة الكهربائية في إعطاء الطلاب مقدمة عامة عن المساق الذي يدرسونه يشرحون فيها تاريخ تطور مختلف علوم الهندسة الكهربائية وأسماء العلماء الذين لعبوا دورا في تطورها ونبذة قصيرة عن بعض جوانب المادة المتعلقة بالمساق والتي لا يمكنهم تغطيتها من خلال الخطة الدراسية.

يتألف هذا الكتاب من إثني عشر فصلا تستعرض أساسيات المساقات الأولية وأساسيات مختلف تخصصات الهندسة الكهربائية. فالفصل الأول يغطي تاريخ الكهرباء والقوانين الأساسية للكهربائية والمغناطيسية وكذلك التأثيرات والظواهر الكهربائية التي يعتمد عليها عمل مختلف أنواع الأجهزة الكهربائية. أما الفصل الثاني فيغطي أساسيات الموجات الكهرومغناطيسية وتركيب الطيف الكهرومغناطيسي وأساسيات الهوائيات وخطوط النقل. أما الفصل الثالث فيغطي أساسيات تخصص القوى والآلات الكهربائية كالمولدات والمحركات والمحولات الكهربائية وطرق توليد ونقل وتوزيع الطاقة الكهربائية. أما الفصل الرابع فيغطي أساسيات تخصص الإلكترونيات من خلال شرح مبسط للصمامات الإلكترونية والترانزستورات والثنائيات وتقنية الدوائر المتكاملة واستخدام هذه العناصر في بناء مختلف أنواع الدوائر الإلكترونية كالمضخمات والمذبذبات والدوائر المنطقية الرقمية وكذلك شرح مبسط لإلكترونيات الموجات الدقيقة والقوى والإلكترونيات الضوئية. أما الفصل الخامس والسادس فيغطي أساسيات تخصص أنظمة الاتصالات من خلال شرح مكونات أنظمة التلغراف والتلكس والفاكس والهاتف وأنظمة التراسل السلكية واللاسلكية وأنظمة البث الراديوي والتلفزيوني. أما الفصل السابع فيغطي أساسيات الحاسوب وشبكات المعلومات كالمنطق الرقمي ومعمارية الحاسوب ولغات البرمجة وأنظمة التشغيل وشرح مبسط عن المعالجات والمتحكمات الدقيقة والحواسيب الشخصية واستخداماتها وتعريف المعلومات وطرق تخزينها وضغطها وتعميتها ونقلها باستخدام شبكات

المعلومات. أما الفصل الثامن والتاسع والعاشر والحادي عشر فيغطي أساسيات أنظمة التحكم والرادار والليزر والأقمار الصناعية فنشرح مكوناتها وأنواعها واستخداماتها المختلفة. وأما الفصل الأخير فيغطي أساسيات مختلف أنواع أجهزة القياس الكهربائية كالمقاييس التي تقيس الكميات الكهربائية كالجهد والتيار والقدرة والطاقة والتردد وتلك التي تستخدم لقياس مختلف أنواع الكميات الفيزيائية الأخرى من خلال استخدام الحساسات والمصوغات.

وأخيرا أسال الله عز وجل أن يكون تأليف هذا الكتاب خالصا لوجهه الكريم وأن ينفع به طلاب العلم على مختلف مستوياتهم. وأتمنى على المختصين في مختلف التخصصات العلمية في العالم العربي تأليف كتب مماثلة تعرف القراء العرب بأساسيات هذه العلوم وتفيد طلاب العلم في هذه التخصصات لرسم صورة متكاملة عن تخصصاتهم والتعرف على بعض جوانب تخصصهم والتي لم يتمكنوا من دراستها وهم على مقاعد الدراسة. وأتمنى كذلك على الجامعات العربية تكليف لجان من أعضاء هيئة التدريس في كل قسم من أقسام التخصصات المختلفة لتأليف مثل هذه الكتب وغيرها من الكتب المتقدمة والتي لا بد وأنها ستثري المكتبة العربية التي تفتقر لمثل هذه الكتب.

الفصل الأول

الكهرباء وقوانينها

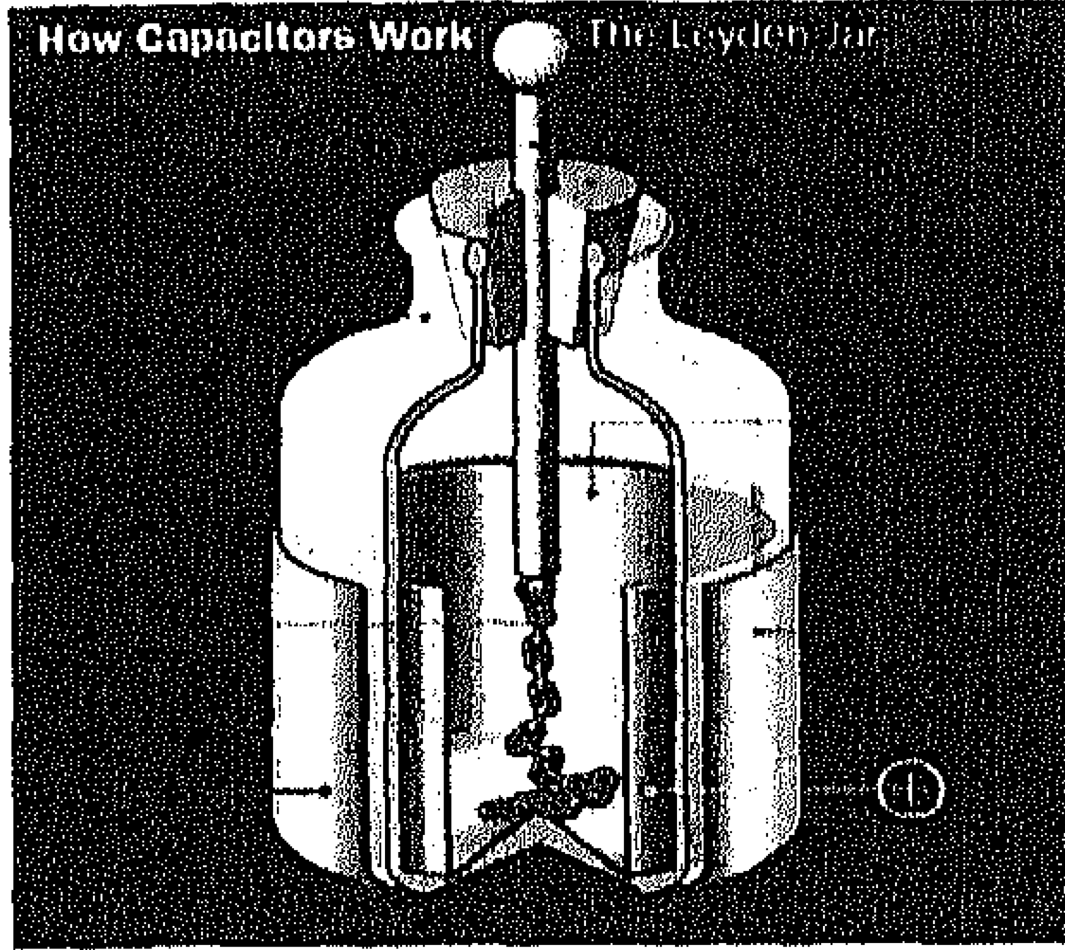
1-1 تمهيد

لقد بقي اهتمام البشر بظاهرة الكهربائية محدودا إلى أن تمكن العالم الإيطالي فولتا في عـام 1800م من تصنيع البطارية وهي أول مصدر يقوم بتوليد الشحنات الكهربائية بشكل متواصل من خلال تحويل الطاقة الكيميائية المخزنة فيها إلى طاقة كهربائية. وتعتبر ظاهرة الكهربائية من أهم الظواهر الفيزيائية التي اكتشفها الإنسان في مطلع القرن التاسع عشر فقد تمكن الإنسان بعد سنوات قليلة من اكتشافها من استغلالها في تصنيع أجهزة ومعدات لعبت دورا بارزا في تسهيل حياة الإنسان على هذه الأرض. والطاقة الكهربائية طاقـة خفيـة تسري بصمت في الأسلاك المعدنية دون أن يحس بها أحد ويمكن للمستخدم أن يأخذ من هذه الأسلاك كميـة الطاقة التي يريدها دون زيادة أو نقصان. إن أهم ما يميز الطاقة الكهربائية هو سرعة انتقالها حيث أنها تنتقل من أماكن توليدها إلى أماكن استعمالها بسرعة تقترب من سرعة الضوء فعندما يقـوم شـخص بكـبس زر لإضاءة مصباح في منزله فإن الطاقة الكهربائية اللازمة لتشغيله ستصل إليه من محطة توليد قد تبعـد عنـه عشرة آلاف كيلومتر في زمن لا يتجاوز ثلاثة بالمائة من الثانية. ومن ميزات الطاقة الكهربائية أنها طاقـة لا كتلة لها ولا حجم ولذا فإن كلفة نقلها لا تكاد تذكر مع كلفة نقل الطاقة المخزنة في مختلـف أنـواع الوقـود كالفحم ومشتقات البترول والغاز. إن أحد أهم استخدامات الطاقة الكهربائية هو في تحويـل مختلـف أشـكال الطاقة إلى طاقة كهربائية نظيفة تتميز بسهولة نقلها وتوزيعها على مستخدميها ومن ثم تقوم أنواع مختلفة مـن الأجهزة الكهربائية بتحويل الطاقة الكهربائية بكفاءة عالية لمختلف أشكال الطاقة الأخرى كالطاقـة الحراريـة والحركية والضوئية والكيميائية والكهرومغناطيسية. أما الاستخدام الذي لا يقل أهمية عن الاستخدام الأول هو في استخدام الكهرباء لنقل إشارات المعلومات بمختلف أنواعها كالإشارات السـمعية والمرئيـة والمقـروءة والمرسومة كما هو الحال مع أنظمة التلكس والهاتف والفاكس والراديو والتلفزيون. وتستخدم الكهربـاء فـي مختلف أنظمة القياس والتحكم وفي الأجهزة الطبية وأجهزة التصوير وفي أجهزة الرادار والليزر.

لقد كان أول استخدام للطاقة الكهربائية هو في نقل المعلومات المكتوبة لمسافات بعيـدة وبسـرعة البرق من خلال نظام التلغراف أو البرق الذي اخترعه الأمريكي مورس في عـام 1839م. ومـن ثـم تـم استخدامها لنقل المكالمات الصوتية من خلال نظام التليفون (الهاتف) الذي اخترعه الأمريكي جراهام بل فـي عام 1875م. وفي عام 1882م تمكن الأمريكي "أديسون" من إضاءة شوارع نيويورك بالمصابيح الكهربائية التي سبق له أن اخترعها في عام 1878م وذلك بعد أن تم تصنيع أول مولد كهربـائي عملـي فـي عـام 1871م. أما الموجات الكهرومغناطيسية فيعود الفضل في اكتشافها لعالم الفيزياء الاسـكتلندي "ماكسـويل" الذي قام في عام 1860م بصياغة جميع القوانين المتعلقة بالكهربائية والمغناطيسـية فـي أربـع معـادلات تفاضلية تنبأ من خلال حلها بوجود الموجات الكهرومغناطيسية. ولقد تحققت نبـوءة ماكسـويل علـى يـد الفيزيائي الألماني "هيرتز" الذي تمكن من اكتشاف الموجات الكهرومغناطيسية في عام 1890م. وقد اسـتغل

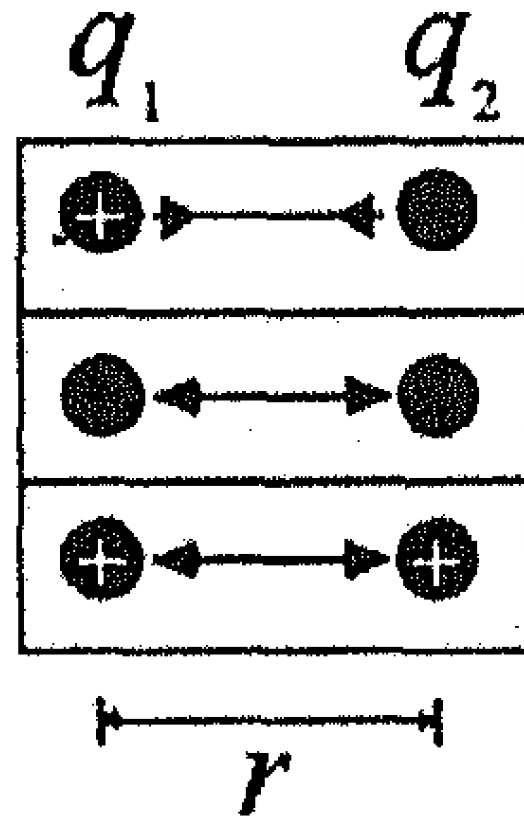
الإيطالي "ماركوني" هذا الاكتشاف العظيم في إرسال أول تلغراف لاسلكي عبر القنال الإنكليزي في عام 1899م وعبر المحيط الأطلسي في عام 1901م.

2-1 الكهرباء الساكنة



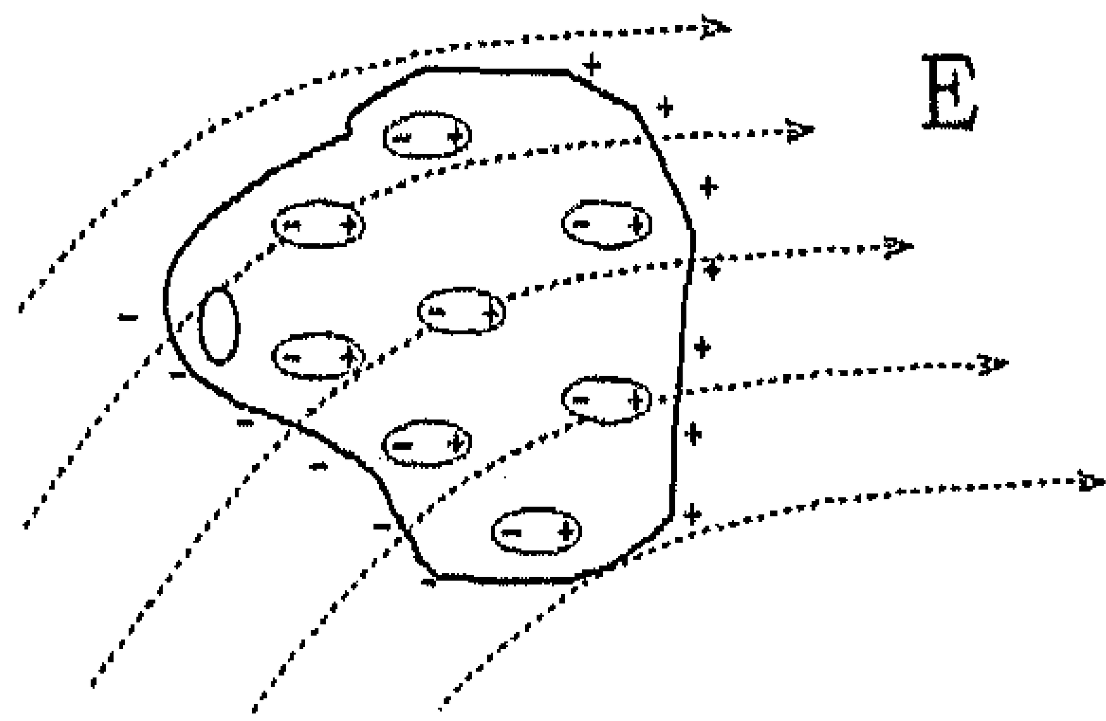
لقد عرف البشر منذ أيام الإغريق ظاهرة الكهرباء الساكنة وذلك عندما لاحظوا أنه عند احتكاك بعض أنواع المواد ببعضها البعض تتولد شرارة كهربائية عند فصلها ولاحظوا كذلك وجود قوى تجاذب وتنافر بين الأجسام الحاملة لهذه الشحنات الكهربائية الساكنة. وفي عام 1663م تمكن العالم الألماني أوتو قوركي(Otto von Guericke) من اختراع آلة لتوليد الشحنات الكهربائية الساكنة من خلال الاحتكاك. ولقد تمكن الكيميائي الفرنسي تشارلز دوفي (Charles du Fay) (1698-1738م) في عام 1733م من تصنيف الشحنات الكهربائية إلى شحنات كهربائية موجبة وأخرى سالبة وكذلك تصنيف المواد إلى مواد موصلة وأخرى عازلة للكهرباء. وقد لاحظ كذلك وجود قوة تنافر بين الشحنات المتماثلة وقوة تجاذب بين الشحنات المختلفة. وقد تم تطوير آلات لتوليد الكهرباء الساكنة من قبل كثير من العلماء فقد قام الفيزيائي الإيطالي اليساندرو فولتا باختراع آلة تعتمد على الحث أو التأثير وليس على الاحتكاك سميت آلة التاثير الكهربائي (electrophorus).

وفي عام 1745م تمكن العالم الدانماركي بيتر موسجنبروك (Pieter Musschenbroek) (1692-1761م) من تصنيع ما يعرف بجرة ليدن (Leyden Jar) وهو جهاز قادر على تخزين كميات كبيرة من الشحنات الكهربائية الساكنة وهو يماثل المكثف الكهربائي المستخدم اليوم. والمكثف (capacitor) هو عبارة عن لوحين معدنيين بينهما عازل ويستخدم لتخزين الشحنات الكهربائية وتتناسب سعة التخزين للمكثف (capacitance) طرديا مع مساحة اللوح المعدني (A) وعكسيا مع المسافة بين اللوحين (d) أي ($C=\varepsilon A/d$). أما ثابت التناسب فيساوي سماحية المادة العازلة (permittivity) ويستخدم الفارد (Farad) كوحدة لقياس سعة المكثف. وفي عام 1780م تمكن الفيزيائي الفرنسي تشارلز كولومب (Charles de Coulomb) (1736-1806م) من وضع قانون لحساب قوة التجاذب والتنافر بين شحنتين كهربائيتين. فقد وجد أن مقدار القوة الكهربائية يتناسب طرديا مع حاصل ضرب مقدار الشحنتين وعكسيا مع مربع المسافة بينهما أي أن له نفس صيغة قانون الجاذبية الذي وضعه نيوتن في القرن السابع عشر. وتساوي قيمة ثابت التناسب في الفراغ (8.99×10^{9} Nm^2/C) وهي معكوس السماحية المطلقة للفراغ (absolute permittivity) والتي تساوي ($\varepsilon_0=8.85\times10^{-9}$) أما قيمة ثابت التناسب في الأوساط الأخرى فهي أقل من تلك التي للفراغ. وقام كولومب كذلك بدراسة توزيع الشحنات الكهربائية

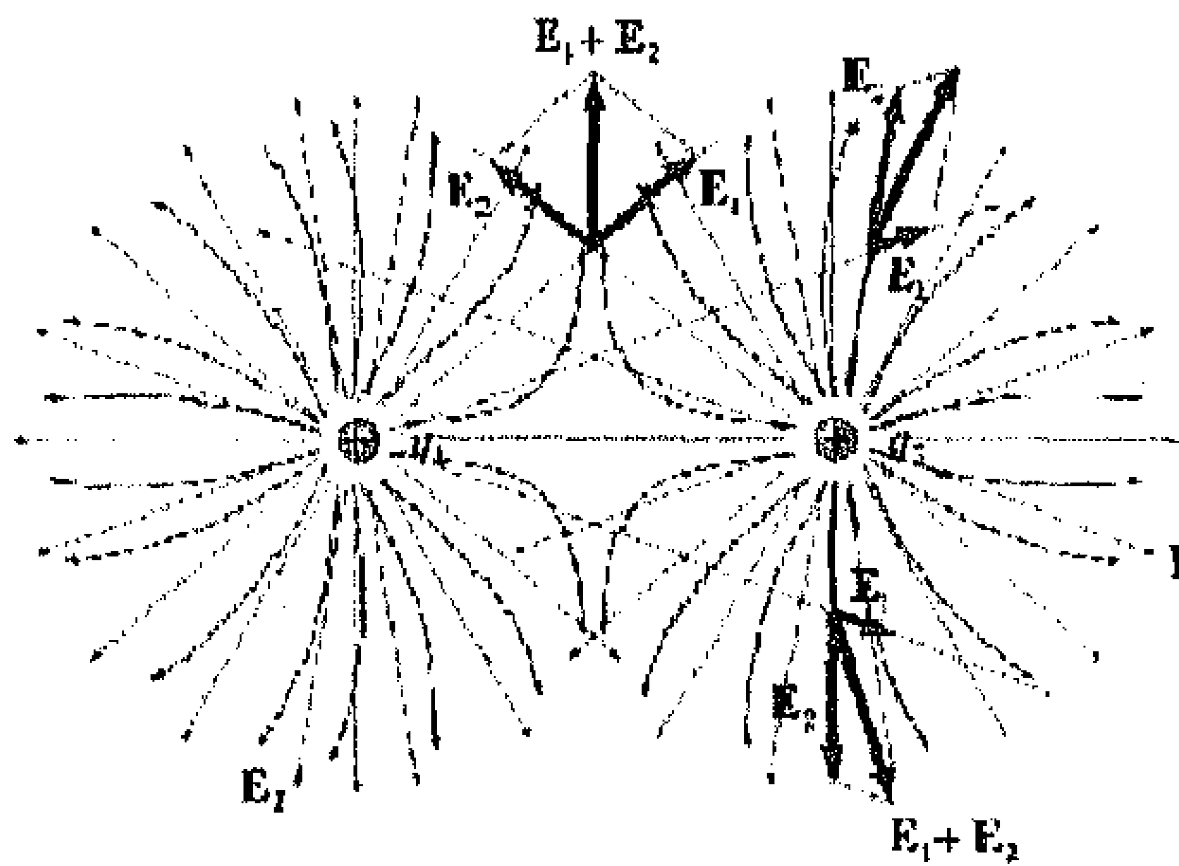


على أسطح الأجسام المعدنية ولذلك فقد أطلق اسـمه علـى وحـدة الشـحنة الكهربائيـة وهـي الكولومـب (coulomb) وذلك تخليدا لذكره.

ولقد أدخل ميشيل فارادي في العشرينات من القرن التاسع عشر مفهوم المجال الكهربائي (electric field) حيث أشار إلى أن الشحنات الكهربائية تنشئ حولها مجالا كهربائيا شبيها من حيث المفهـوم مجـال الجاذبية الذي ينشأ حول الأجسام أو الأجرام. ولقد تم تعريف شـدة المجـال الكهربـائي (electric field intensity or strength (E)) على أنها مقدار القوة التـي تؤثر على شحنة اختبار موجبـة (positive test charge) بقيمة كولومب واحد إذا ما وقعت في مجال شحنة كهربائية ما سواء كانت موجبة أو سالبة وتقاس بالنيوتن لكل كولومب أو الفولت لكل متر (volt per meter(V/m)). فإذا كانت الشحنة موجبة فإن اتجاه القوة التي سـتؤثر علـى شـحنة الاختبار سيكون باتجاه الخط الواصل من الشحنة إلى شـحنة الاختبار والعكس للشحنة السالبة. أما القانون الذي يحدد شدة المجال الكهربائي فهو نفس قانون كولومـب مـع تعويض قيمة شحنة الاختبار بواحد كولومب مما يعني أن شدة المجال الكهربائي تتناسب طرديـا مـع قيمـة الشحنة التي تنشأ المجال وعكسيا مع مربع المسافة بينها وبين شحنة الاختبار.



ومن الواضح أن شدة المجال الكهربائي هي كمية متجه (vector quantity) أي أن القوة المحصلة التي تقع على شحنة الاختبار من عدد من الشحنات الموزعة في الفراغ يتم إيجادها من خـلال جمـع القـوى المؤثرة عليها من كل شحنة باستخدام قوانين المتجهات وليس جمعا جبريا. وعادة ما يتم رسـم اتجـاه شـدة المجال الكهربائي حول مجموعة من الشحنات على شكل خطوط تنطلق من مواقع الشحنات وبحيـث يكـون المماس للخط عند أي نقطة هو اتجاه المجـال. إن شـدة المجال الكهربائي في الأوساط المختلفة أقل من شدته في الفراغ ويعود السبب في ذلك إلى ظـاهرة الاسـتقطاب (polarization) والتي تنشأ في مادة الوسـط. وتعـود ظاهرة الاستقطاب إلى التشويه (deformation) الـذي يطرأ على بنية الذرات والجزيئات عند تسـليط المجـال الكهربائي حيث تنزاح الإلكترونات بعكس اتجاه المجـال بينما تنزاح البروتونات باتجاه المجال مكونة ما يسـمى الثنائيقطبي (dipole). ويتكون نتيجة للتوزيع غير المتماثل للإلكترونات والبروتونات في الذرات والجزيئـات مجالا كهربائيا له اتجاه يعاكس اتجاه المجال المسلط أو ينحرف قليلا عنه مما يعمل على تقليل شـدة المجـال الكلي في داخل المادة عن قيمتها في الفراغ, وتتفاوت المواد تفاوتا كبيرا في مقدار الاستقطاب الذي يحدث في داخلها بسبب الاختلاف في تركيبها الذري والجزيئي وقد تم تمثيل مقدار الاستقطاب بمعامل يسمى السـماحية النسبية (relative permittivitty) والتي تساوي شدة المجال في الفراغ مقسوما على شدته في المادة المعنية وهي دائما أكبر أو تساوي الواحد. وبسبب اختلاف شدة المجال الكهربائي في الأوساط المختلفة النـاتج عـن نفس الشحنات تم تعريف كمية جديدة للمجال الكهربائي لا تعتمد قيمتها على نوع المادة بل على قـيم وتـوزع الشحنات والبعد وهي كثافة الفيض الكهربائي ((electric flux density (D)) ووحدتها كولومب لكـل متـر



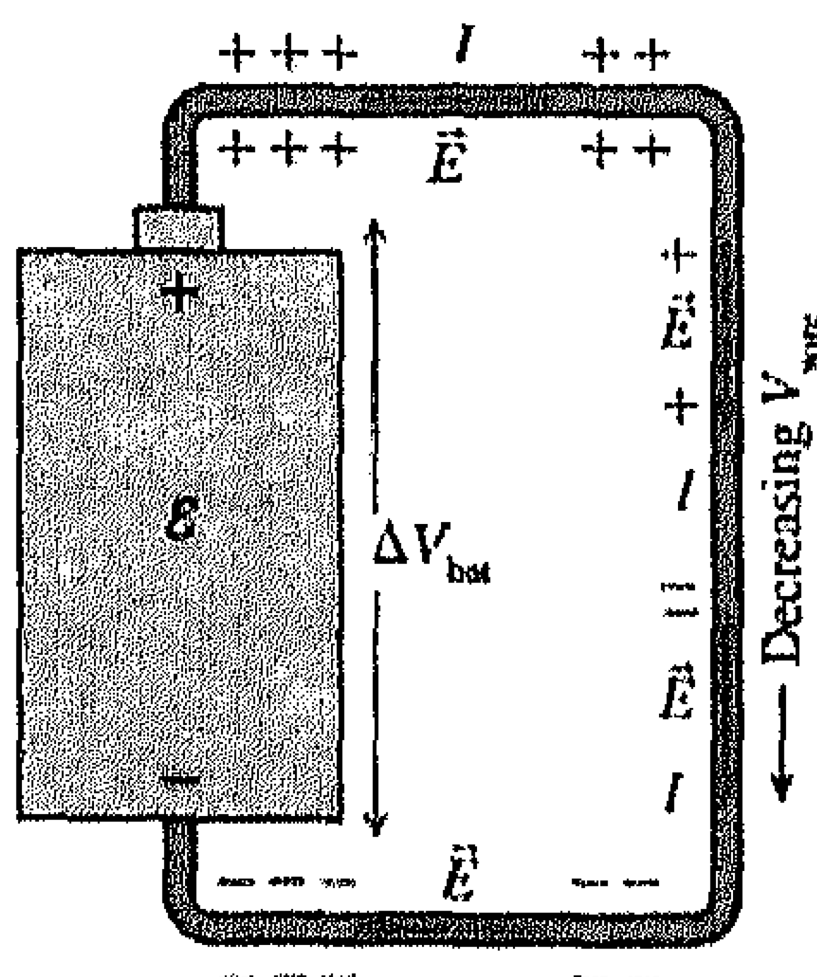
مربع. وبهذا يمكن إيجاد شدة المجال الكهربائي (E) من كثافة الفيض الكهربائي (D) من خلال تقسيمها على السماحية المطلقة للمادة وهي حاصل ضرب السماحية المطلقة للفراغ في السماحية النسبية للمادة ($\varepsilon = \varepsilon_r\, \varepsilon_0$) أي ($E=D/\varepsilon$).

3-1 البطارية (Battery)



تم اختراع البطارية كمصدر مستمر للطاقة الكهربائية على يد الفيزيائي الإيطالي اليساندرو فولتا (Alessandro Volta) (1745م-1827م) وذلك في عام 1800م. وقد قام فولتا قبل اختراعه للبطارية بتجارب كثيرة على الكهرباء الساكنة حيث قام بدراسة الكهرباء الجوية وأجرى بعض التحسينات على جهاز توليد الكهرباء الساكنة المسمى (electrophorus) والذي تم اختراعه على يد العالم السويدي جوهان ويلكي (Johan Carl Wilcke) في عام 1765م. وقام كذلك باختراع جهاز لإشعال الغازات باستخدام الشرارة الكهربائية واكتشف العلاقة بين الجهد المقاس بين طرفي المكثف (V) وكمية الشحنة المخزنة فيه (Q) والتي وجد أنها علاقة خطية ($V= Q/C$). وفي عام 1791م بدأ فولتا بدراسة ظاهرة الكهرباء التي تولدها أجسام الحيوانات والتي اكتشفها قبله الطبيب الإيطالي لوجي جلفاني (Luigi Galvani) بالصدفة في عام 1783م. فعندما قام جلفاني بغرس مشرح معدني في رجل ضفدعة ميتة تحركت الرجل بشدة عندما تلامس المشرح مع طاولة التشريح المعدنية والتي كانت لحسن الحظ من معدن يختلف عن معدن المشرح ولقد عزى جلفاني هذا الأمر إلى وجود كهرباء في أجسام الكائنات الحية.

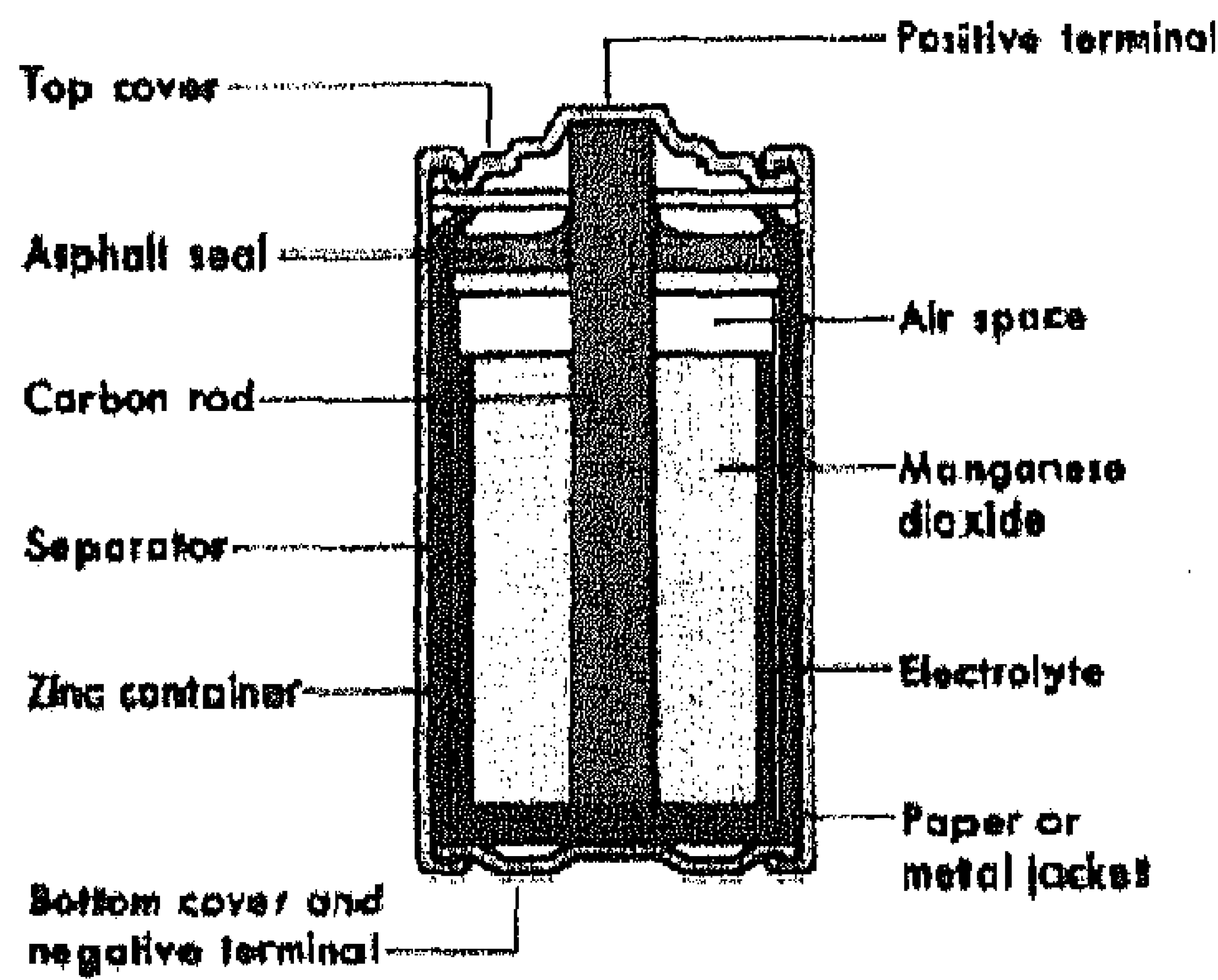
ولقد تمكن فولتا من إكتشاف السبب وراء مصدر الكهرباء هذه عندما أجرى تجربة غرس فيها قضيبان من معدنيين مختلفين في ورقة مشبعة بالملح بدلا من جسم الضفدعة فتولد فرق جهد بين القضيبين المعدنيين. وبهذه التجربة اكتشف فولتا ظاهرة التفاعل الكهروكيميائي والتي مفادها أنه يمكن الحصول على فرق جهد كهربائي من خلال وضع قضيبين معدنيين مختلفين في محلول ملحي أو حامضي (electrolyte). وغالبا ما يستخدم الزنك والنحاس والرصاص والفضة والكربون كقضبان معدنية ومحلول ملح الطعام والأحماض المختلفة كحامض الكبريتيك كمحاليل كهربائية. ويطلق على الوحدة الأساسية للبطارية اسم الخلية الكهربائية (electric cell) حيث تتكون البطارية من عدد من الخلايا توصل على التوالي لزيادة فرق الجهد أو على التوازي لزيادة التيار الذي يمكن تزويده من البطارية. وكانت البطارية الأولى التي صنعها فولتا تتكون من رزمة من أقراص الزنك والنحاس يوجد بين كل قرصين منهما طبقة من ورق مقوى مشبع بمحلول ملح الطعام ويتم وصل قطبي البطارية بقرصي الزنك والنحاس الخارجيين. ولقد تم تكريم مخترع البطارية الفيزيائي فولتا وتخليد ذكره بإطلاق اسمه على وحدة الجهد الكهربائي (electrical potential) وهي الفولت (Volt).



وللحصول على جهد كهربائي لا بد من وجود مجال كهربائي (electric field) ففرق الجهد بين نقطتين تقعان في داخل مجال كهربائي هو تكامل شدة المجال الكهربائي على أي خط يصل بين

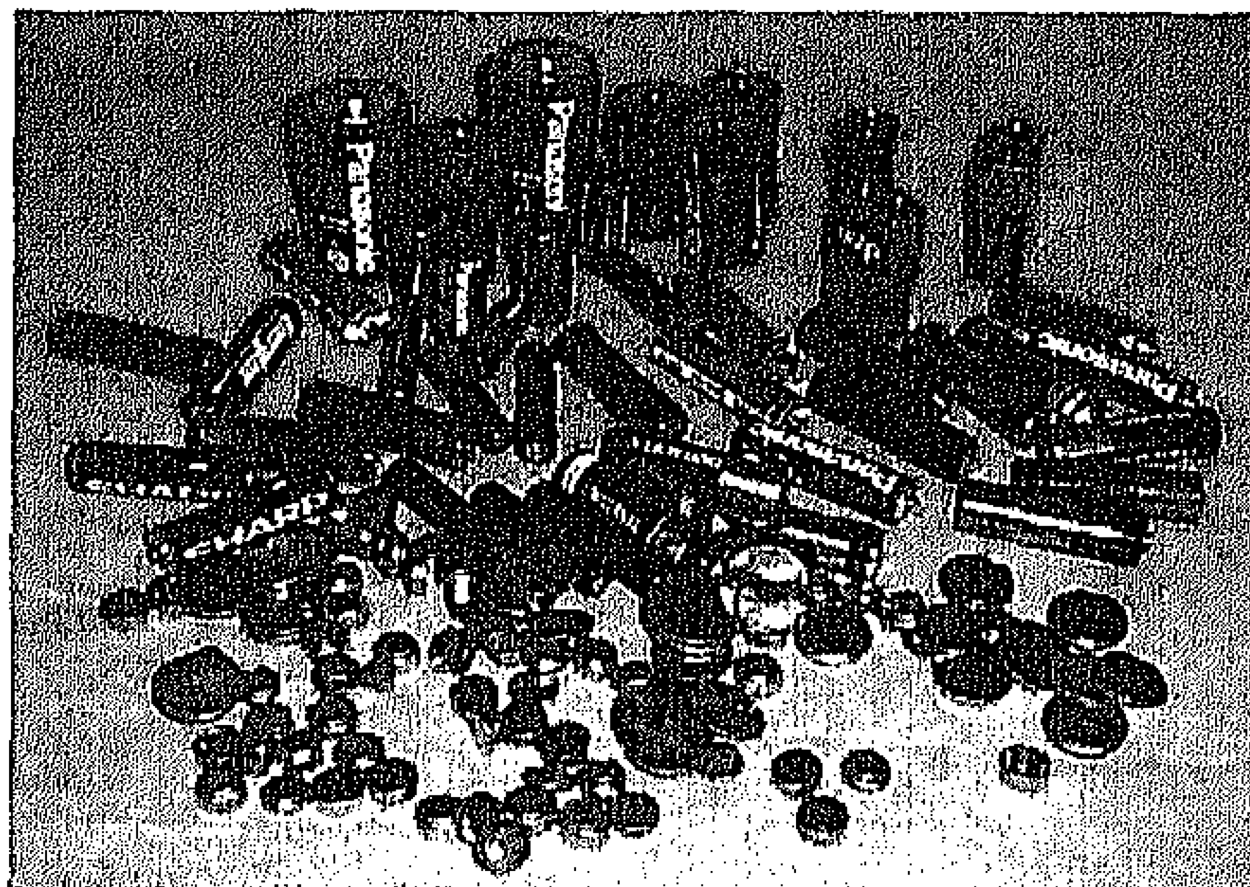
النقطتين. ففي داخل البطارية ينتج عن التفاعل الكهروكيميائي تراكم للشحنات الموجبة على القطب الموجب للبطارية وشحنات سالبة على القطب السالب مما ينتج عنه مجالا كهربائيا بين القطبين في داخل البطارية. وعند وصل قطبي البطارية ببعضهما باستخدام بعض المواد الموصلة كالمعادن فإن مجالا كهربائيا خارجيا سينشأ في داخل المواد الموصلة ويكون اتجاهه من القطب الموجب إلى القطب السالب وسيدفع هذا المجال الإلكترونات الحرة الموجودة فيها للتحرك بعكس اتجاه المجال أي من القطب السالب إلى القطب الموجب. ويطلق على سيل الإلكترونات التي تتحرك في الدائرة الخارجية اسم التيار الكهربائي (electric current) وقد تم اختيار اتجاه التيار الكهربائي ليكون من القطب الموجب إلى القطب السالب وذلك عكس اتجاه حركة الإلكترونات. وشدة التيار الكهربائي هي كمية الشحنة الكهربائية التي تسري في الموصل خلال ثانية واحدة وقد تم اختيار الأمبير (Ampere) كوحدة للتيار الكهربائي والذي يساوي شحنة قيمتها كولومب واحد تمر في الموصل خلال ثانية واحدة. ولقد تم اختراع أنواع مختلفة من البطاريات فيما بعد بخصائص وقدرات مختلفة ففي عام 1859م اخترع الفرنسي جاستون بلانتي (Gaston Plante) بطارية قابلة للشحن مكونة من الرصاص وثاني أكسيد الرصاص كأقطاب وحامض الكبريتيك كمحلول وتستخدم هذه البطارية اليوم بكثرة في السيارات لتشغيل محركاتها وفي نظم إشعالها.

وفي عام 1866م اخترع الفرنسي جورج ليكلانشي (George Leclanche) البطارية الشهيرة والتي لا زالت تستخدم حتى اليوم والتي تتكون من كلوريد الأمونيوم كمحلول كهربائي والزنك كقطب موجب وثاني أكسيد المغنيز كقطب سالب. وقد تم استخدام قضيب من الكربون لجمع التيار من معجون ثاني أكسيد المغنيز وتعطي هذه البطارية فرق جهد يبلغ واحد ونصف فولت. وفي عام 1899م اخترع ولدمار جونقنر (Waldmar Jungner) بطارية النيكل-كادميوم القابلة للشحن.



وفي عام 1901م اخترع الأمريكي ثوماس أديسون (Thomas Edison) بطارية المحلول القاعدي (Alkaline) وهي لا تختلف في تركيبها عن بطارية ليكلانشي سوى باستخدام محلول قاعدي مثل هيدروكسيد البوتاسيوم بدلا من المحلول الحامضي ولكنها في المقابل أطول عمرا وأكثر تحملا وهي شائعة الاستخدام اليوم.

تصنف البطاريات تبعا لأنواع الأقطاب المعدنية والمحاليل الكهربائية المستخدمة وفيما إذا كانت قابلة للشحن (rechargable) أو غير قابلة للشحن وفيما إذا كانت سائلة (wet cells) أو جافة (dry cell). وتتفاوت البطاريات تفاوتا كبيرا في مواصفاتها المختلفة والتي أهمها فرق الجهد والسعة التخزينية وكثافة الطاقة المخزنة وكذلك العمر التشغيلي والحجم والوزن والشكل. ففرق الجهد مقاسا بالفولت يحدد من نوع الأقطاب والمحلول وسعة البطارية (capacity) تحدد من



حجم البطارية وهي كمية الشحنة المخزنة والتي تعطى بوحـدة الأمبيـر-سـاعة (Ampere-hours (Ah)) والتي يمكن تحويليها إلى وحدة الطاقة وهي الواط-ساعة (Watt-hour) بضرب الأولى بجهـد البطاريـة. وتستخدم وحدة الأمبير - ساعة لسهولة حساب مدة عمل البطارية قبل نفاد طاقتها فبطارية بسعة 500 مللـي أمبير-ساعة تعمل لمدة 5 ساعات إذا كان الجهاز الذي تشغله يسحب 100 مللي أمبير. أما كثافة الطاقة فـي البطارية فتقاس بالجول لكل كيلوغرام من وزن البطارية وزيادتها يقلل من أحجام البطاريات. فمن البطاريات غير القابلة للشحن بطارية الزنك-كربون (Zinc-Carbon) بجهد 1.5 فولت وكثافة نوعية 0.13 ميجـاجول لكل كيلوجرام وبطارية ثاني أكسيد المنغنيز- الزنك (zinc–manganese dioxide) بجهد 1.5 فولت وكثافة نوعية 0.6 ميجاجول لكل كيلوجرام وبطارية ثاني أكسـيد المنغنيـز- الليثيـوم (Lithium–manganese dioxide) بجهد 3 فولت وكثافة نوعية 1 ميجاجول لكل كيلوجرام. . ومن البطاريات القابلة للشحن بطاريـة الحامض-الرصاص (Lead-Acid) بجهد 2.1 فولت وكثافة نوعية 0.14 ميجاجول لكل كيلوجرام وبطاريـة أيون-ليثيوم (Lithium-ion) بجهد 3.6 فولت وكثافة نوعية 0.46 ميجاجول لكل كيلـوجرام. وغالبـا مـا تستخدم البطاريات في الأجهزة الكهربائية المحمولة كالراديوات والمسجلات والحاسبات اليدويـة والهواتـف الخلوية والساعات اليدوية والمصابيح الكهربائية اليدوية وكذلك في مختلف أنواع المركبات. وتـراوح أحجـام البطاريات من الصغيرة جدا التي قد يصل حجمها حجم حبة العدس وتستخدم في الساعات اليدوية إلى الكبيـرة جدا التي قد تزن عشرات الكيلوغرامات وتستخدم في المركبات المختلفة.

1-4 قوانين الكهربائية والمغناطيسية

بعد اختراع البطارية الكهربائية انصبت جهود العلماء في أوروبا والولايات المتحدة الأمريكية على دراسة خصائص التيار الكهربائي المتولد من هذه البطارية وذلك من خلال ربط أسلاك بين قطبيها مصـنوعة من مواد معدنية مختلفة. وفي خلال ثلاثين عاما فقط تمكن هؤلاء العلماء من كشف معظم قـوانين الكهربـاء على الرغم من تباعد المسافات بينهم وكذلك غياب وسائل الاتصال الحديثة التي تمكنهم من معرفة الإنجـازات التي تتم على أيدي غيرهم في هذا المجال. إن الكهرباء ظاهرة خفية لا تدركها حواس البشر ولـذلك تحتـاج لقياس كمياتها المختلفة أجهزة ومعدات معقدة ولكن مما يثير الدهشة وكذلك الإعجاب أن هؤلاء العلمـاء قـد تمكنوا من كشف معظم قوانين الكهرباء باستخدام أجهزة بدائية جدا كان أهمها البوصلة. لقد كانت الرياضيات أقوى سلاح استخدمه هؤلاء العلماء لكشف أسرار هذه الظاهرة الخفية وكانت نتائجهم من الدقة بحيث لم يـتم أي تعديل يذكر على معظم القوانين التي اكتشفوها.

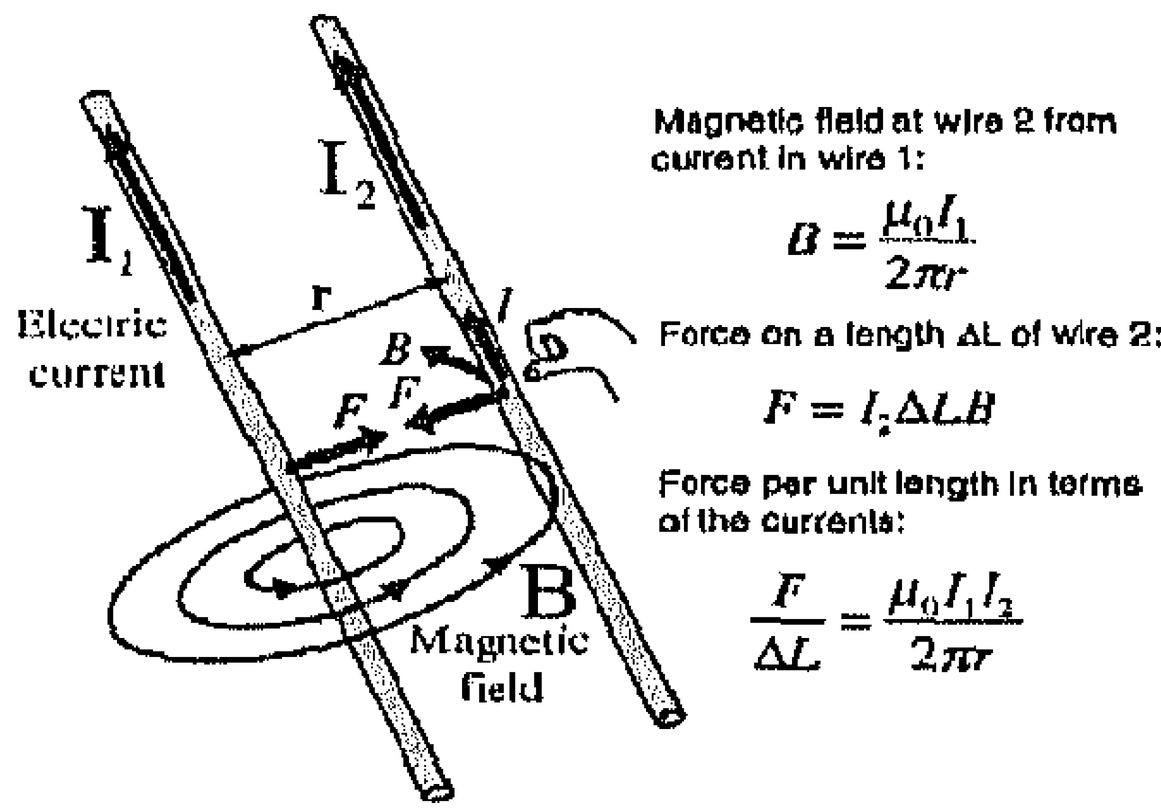
قوانين أمبير(Ampere's Law)



في عام 1820م اكتشف الفيزيائي الدانيماركي هـانز أورسـتد (Hans Oersted) (1777-1851م) بالصدفة أثناء قيامه بتجربة أمـام طلابه حول الظاهرة الكهربائية أن التيار الكهربائي ينتج مجالا مغناطيسيا (magnetic field) حوله وذلك عند مشاهدته لانحراف إبرة البوصـلة عند وجودها بجانب سلك يحمل تيارا كهربائيا. وفي نفـس العـام قـام الفيزيائي والرياضي الفرنسـي أنـدري أمبيـر (Andre Ampere)

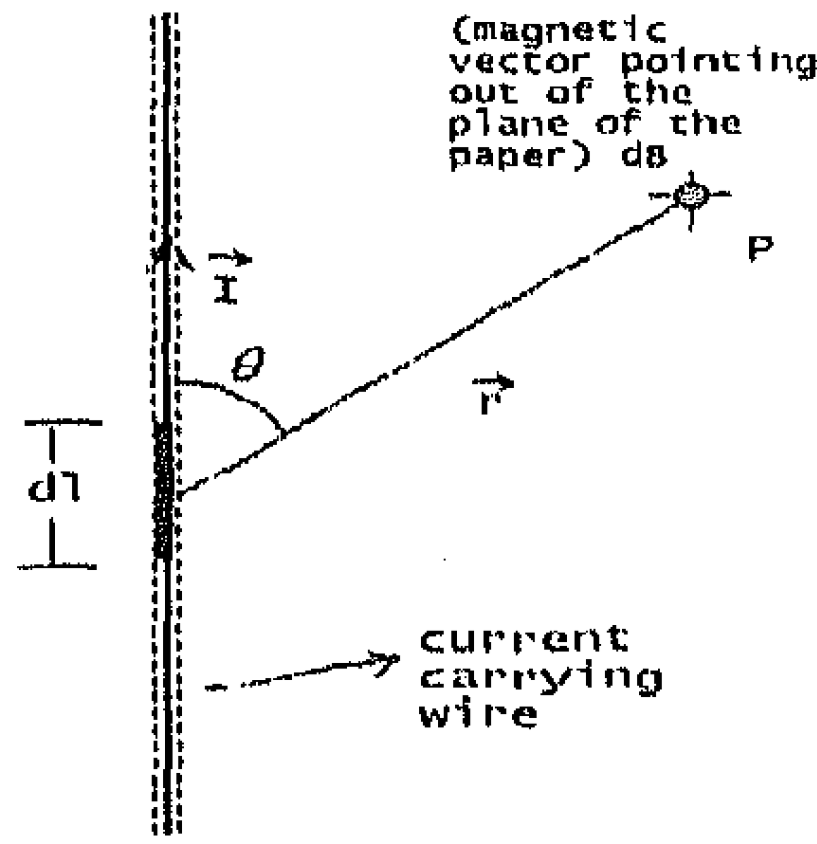
(1775-1836م) بدراسة هذه الظاهرة وتوصل لعدة حقائق منها أن اتجاه المجال المغناطيسي المتولد يكــون عاموديا على اتجاه التيار وأن خطوط المجال المغناطيسي تشكل دوائر حول التيار الــذي أنتجهــا. وقــد تــم تعريف شدة المجال المغناطيسي(magnetic field intensity or strength (H)) على أنها مقــدار القــوة التي تؤثر على سلك يحمل تيار بقيمة أمبير واحد إذا ما وقع في داخل هذا المجال وتقاس بالأمبير لكل متر (Ampere per meter(A/m)). وقد تم تعريف كثافة الفــيض المغناطيســي (magnetic flux density (B)) على أنها كمية الفيض المغناطيسي الذي يقطع وحدة المســاحة ووحــدتها ويبــر لكــل متــر مربــع ($Weber/m^2$) أو تسلا (Tesla).

إن شدة المجال المغناطيسي في الأوساط المختلفة على عكس شدة المجال الكهربائي لا تعتمد علــى نوع الوسط بينما تعتمد كثافة الفيض المغناطيسي على الوسط وهي أعلى أو تساوي شدته في الفــراغ ويعــود السبب في ذلك إلى ظاهرة التمغنط (magnetization) التي تنشأ في مادة الوسط. وتعود ظاهرة التمغنط إلى أن الحركة المغزلية والدائرية للإلكترونات في ذرات بعض المواد تعمــل كمغناطيســات ميكرويــة موجهــة باتجهات مختلفة وعند تسليط المجال المغناطيسي على الوسط فإنه يتفاعل مع هذه المغناطيسات فيجبرها لتتجه في اتجاه واحد لتنتج مجالا مغناطيسيا داخليا في اتجاه المجال المسلط مما يزيد من قيمة المجال الكلــي عــن قيمته في الفراغ, وقد تم تمثيل مقدار التمغنط بمعامل يسمى النفاذية النسبية (relative permiability) والتي تساوي كثافة المجال في الوسط مقسوما على كثافته في الفراغ وهي إما أكبر أو أصغر أو تســاوي الواحــد. ويمكن إيجاد شدة المجال المغناطيسي (H) من كثافة الفيض المغناطيسي (B) من خلال تقسيمها على النفاذيــة المطلقة للمادة وهي حاصل ضرب النفاذية المطلقة للفــراغ فــي النفاذيــة النســبية للمــادة ($\mu = \mu_r \mu_0$) أي ($H=B/\mu$). وتسمى المواد التي لها معامل نفاذيــة أكبــر بكثيــر مــن واحــد بــالمواد الفيرومغناطيســية (ferromagnetic) وهي الحديد والكوبلت والنيكل وتلعب دورا كبيرا في صــناعة الآلات الكهربائيــة. أمــا المواد التي لها معامل أكبر بقليل من واحــد فتســمى المواد الدايامغناطيسية (diamagnetic) وهي معظم عناصر الجدول الدوري كالفضة والذهب والنحــاس. وأما المواد التي معاملها أقل بقليل من واحد فتســمى المــــواد البرامغناطيســــية (paramagnetic) كالمغنيسيوم والليثيوم . ولقد تمكن أمبير باســتخدام الرياضــيات مــن وضــع أحــد أهــم قــوانين الكهرومغناطيسية والمسمى باسمه والذي ينص على أن تكامل شدة المجال المغناطيسي حول أي مسار مغلق يحيط بالتيار الكهربايي يساوي قيمة التيار مضروبا بثابت تناسب معين وهو النفاذية المغناطيسية. ولقد اكتشف أمبير أيضا أن الأسلاك التي تحمل تيارات كهربائية في نفس الاتجاه تتنافر بينما تتجاذب إذا كانــت بعكــس بعضها وهذه الظاهرة هي أساس الكهروديناميكا والتي يعمل على أساسها المحرك الكهربــائي. وقــد صــاغ أمبير هذه الظاهرة بقانون آخر له وهو قانون أمبير للقوة والذي ينص على أن قوة التنافر أو التجــاذب بــين سلكين مستقيمين يحملان تيارين تتناسب طرديا مع حاصل ضرب قيمة التيارين وعكسيا مع المسافة الفاصلة بينهما ويساوي ثابت التناسب ثابت النفاذية المغناطيسية (permeability). ولقد تم تكريم هذا العــالم الشــهير وتخليد ذكره بإطلاق إسمه على وحدة التيار الكهربائي وهو الأمبير (Ampere).



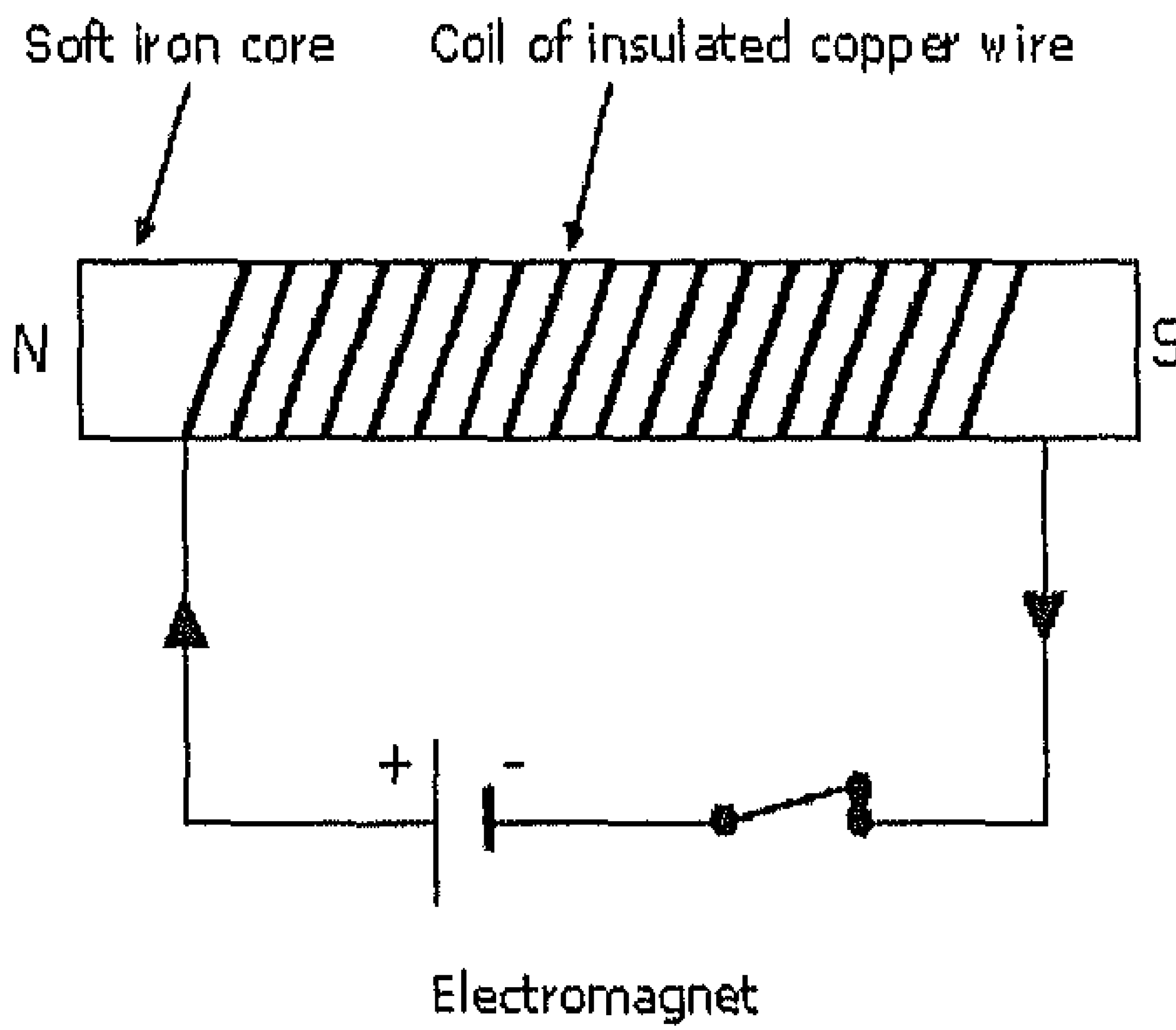
قانون بايوت-سافارت (Biot-Savart Law)

تمكن الفيزيائيان الفرنسيان جين بايوت (Jean Biot) (1774-1862م) وفلكس سافارت (Felix Savart) (1791-1841م) في عام 1820م من وضع قانون يحدد شدة المجال المغناطيسي المتولد من التيار الكهربائي عند أي نقطة في الفضاء المحيط بالتيار. وينص قانون بايوت-سافارات على أن شدة المجال المغناطيسي المتولد عن تيار كهربائي محمول في سلك يؤول طوله للصفر عند أي نقطة في الفضاء يتناسب طرديا مع قيمة التيار وعكسيا مع بعد النقطة عن السلك ويكون اتجاه المجال عاموديا على كل من اتجاه السلك واتجاه الخط الواصل بين السلك والنقطة المعنية وذلك حسب قاعدة إبهام اليد اليمنى.



المغناطيس الكهربائي والحث الذاتي(Electric Magnet & Self Inductance)

لاحظ الإنسان منذ القدم ظاهرة المغناطيسية في بعض أنواع الأحجار المعدنية والتي سميت بالمغناطيسات وذلك بعد أن شاهد قدرتها على جذب القطع الحديدية ولاحظ كذلك وجود قوى تجاذب وتنافر بين أقطاب هذه المغناطيسات ولكن لم يتمكن أحد من إكتشاف وجود علاقة بين ظاهرتي الكهربائية والمغناطيسية إلا في بداية القرن التاسع عشر. فقد تمكن الفيزيائي الإنكليزي وليم ستورجيون (William Sturgeon) (1783-1850م) في عام 1824م من تصنيع أول مغناطيس كهربائي من خلال لف سلك معزول حول قضيب من الحديد. وقد قام الفيزيائي الأمريكي جوزيف هنري (Joseph Henry) (1798-1878م) بعدة تحسينات على المغناطيس الكهربائي واخترع كذلك المرحل الكهربائي (electric relay) والذي لعب دورا مهما في نظام التلغراف الذي اخترع فيما بعد. أما إسهام هنري الأكبر في الكهرباء فهو اكتشافه لمبدأ الحث الذاتي (self inductance) والذي مفاده أن الملفات الكهربائية (electrical coils) تقاوم أي تغيير في قيمة التيار المار بها من خلال توليد فيضا مغناطيسيا (magnetic flux) متغيرا يعمل على توليد قوة دافعة كهربائية في الملف باتجاه يقلل من معدل تغير التيار. وتحدد قيمة الحث الذاتي لأي ملف بقسمة كمية الفيض المغناطيسي الذي يولده على قيمة التيار المار فيه وقد سميت وحدة الحث الذاتي بالهنري تخليدا لذكر هذا العالم. وقد اكتشف هنري أيضا بالتزامن مع فارادي قانون الحث المتبادل (mutual inductance) أو ما يسمى بقانون فارادي للحث ولكن فارادي سبق هنري في نشر نتائج أبحاثه ولذلك سمي القانون باسمه.



Electromagnet

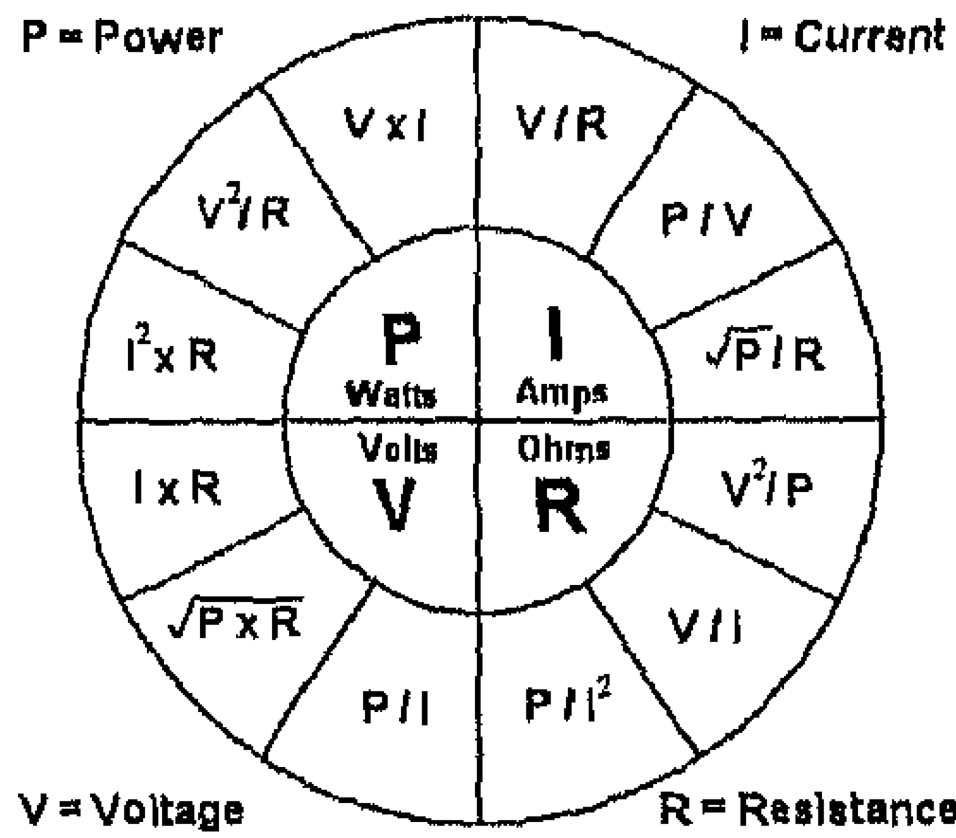
قانون أوم (Ohm's Law)



قام أستاذ المدرسة الألماني جورج أوم (Georg Ohm) (1787-1854م) بدراسة مقدار التيار المار في مختلف أنــواع وأحجــام الأســلاك المعدنية وقد لاحظ أن كمية التيار تزداد كلما زاد قطر السلك وتقل كلمــا زاد طوله وبناءا على ذلك قام في عام 1927م بوضع قانونه المشهور الذي يحدد كمية التيار المار في الدائرة الكهربائيــة (I) مقاســا بــالأمبير (Ampere) فوجده يساوي حاصل تقسيم الجهد الكهربائي للبطارية (V) مقاسا بالفولــت (Volt) على مقاومة الدائرة (R) مقاسة بــالأوم (Ohm) (R=V/I). وقــد لاحظ أوم أيضا أن بعض المواد لا تسمح بمرور التيار الكهربائي من خلالها فأطلق عليها اسم المواد العازلــة (insulators) بينما تسمح مواد أخرى بمروره فأسماها المواد الموصلة (conductors). وقد قوبلــت نتــائج أبحاث أوم بالرفض في بداية الأمر وتم طرده من المدرسة التي كان يدرس فيها وعاش فقيرا يائسا ولم يتبين للعلماء أهمية أبحاثه إلا في عام 1849م ولذا تم الاعتذار له وتعينه أستاذا في جامعة ميونخ في ذلــك العــام. ولقد تم تكريم أوم وتخليد ذكره بسبب هذا الانجاز بإطلاق إسمه على وحدة المقاومة الكهربائية وهي الأوم.

قانون جول الأول (Joule's First Law)

تمكن الفيزيائي الإنكليزي جيمس جول (James Joule) (1818-1889م) في عــام 1840م مــن اكتشاف قانون استخدمه لحساب كمية الطاقة الحراريــة التــي يولدها التيار المار في سلك له مقاومة معينة حيــث وجــد أن كمية القدرة (power) المتولدة مقاسة بالواط تساوي حاصــل ضرب قيمة المقاومة في مربــع قيمــة التيــار ($P = R I^2$). وباستخدام قانون أوم وقانون جول الأول يمكن اشتقاق علاقات مختلفة تربط الكميات الأربعة مع بعضها البعض وهي الجهــد (V) والتيار (I) والمقاومة (R) والقدرة (P) كما هو موضــح في الشكل المرافق. ويمكن حساب كمية الطاقــة (energy) من خلال ضرب القدرة في الزمن إذا كانت القــدرة ثابتــة أو مــن خــلال اســتخدام التكامــل الرياضــي (integration) إذا كانت متغيرة. ويستخدم الجول (Joule) كوحدة لقياس كمية الطاقة وذلك تخليدا لذكر هــذا العالم والذي له إسهامات كثيرة أخرى أهمها تحديد كمية الحرارة المتولدة من الطاقة الحركية أو مــا يســمى المكافيء الميكانيكي للحرارة. ولا بد هنا من التذكير بأن وحدة القدرة هي الواط (Watt) نسبة إلى المختــرع الأسكتلندي جيمس واط (James Watt) (1736-1819م) وهو مخترع الآلة البخارية الحديثة.



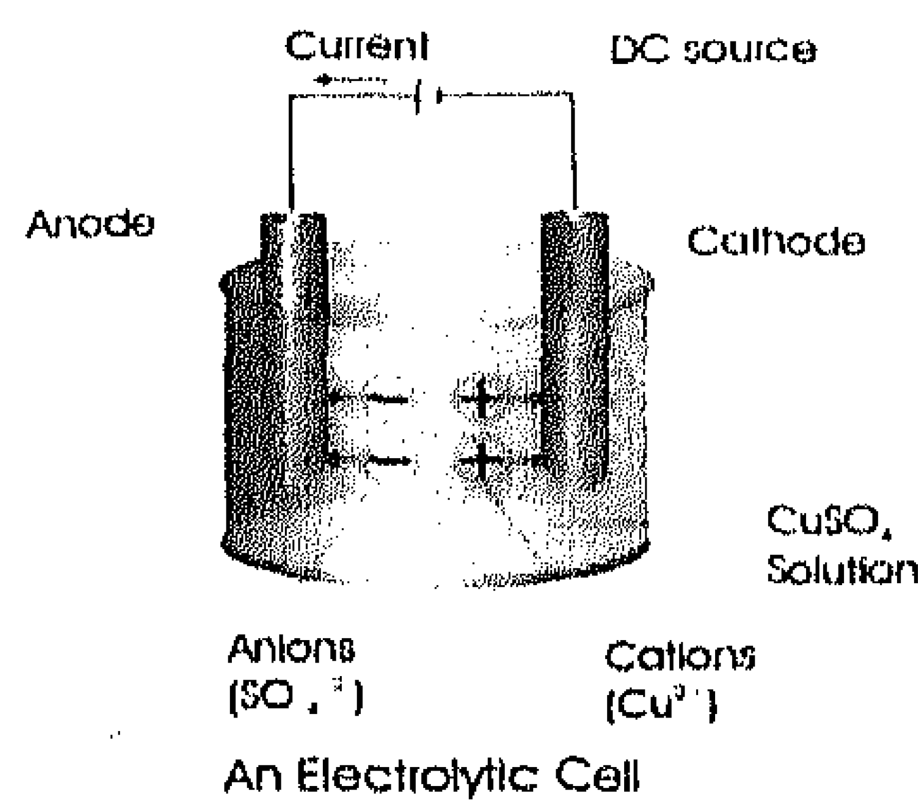
قوانين فارادي للتحليل الكهربائي (Faraday's Laws of Electrolysis)

لعب الفيزيائي والكيميائي الإنكليزي ميشيل فــارادي (Michael Faraday) (1791-1867م) دورا بارزا في مجال الكهرباء وله مساهمات عدة في هذا المجال فقد وضع ككيميائي قــوانين التحليــل الكهربــائي (Faraday's Laws of Electrolysis) وكفيزيائي قــانون الحــث (Faraday's Law of induction) .

تنشأ ظاهرة التحليل الكهربائي (Electrolysis) عن أن بعض المركبات الكيميائية عند إذابتها في الماء أو عند صهرها تتحلل جزيئاتها إلى أيونات موجبة وأخرى سالبة ولذا يطلق عليها اسم المحاليل الكهربائية (electrolyte). وعند تمرير تيار كهربائي في هذه المحاليل باستخدام أقطاب كهربائية (electrodes) فإن الأيونات السالبة تذهب إلى القطب الموجب والأيونات الموجبة إلى القطب السالب وغالبا ما تترسب هذه الأيونات على الأقطاب أو تتحرر كغازات. وينص قانون التحليل الكهربائي الأول الذي اكتشفه فرادي في عام 1832م على أن كمية المادة المترسبة أو المتحررة تتناسب طرديا مع شدة التيار الكهربائي وبثابت تناسب يعتمد على نوع المحلول. أما القانون الثاني فينص على أنه عند تمرير نفس شدة التيار في محاليل كهربائية مختلفة فإن كمية المادة المترسبه أو المتحرره تتناسب مع المكافئ الكيميائي للمحلول (chemical equivalent) والذي يساوي الوزن الذري (massatomic) مقسوما على التكافؤ (valence).



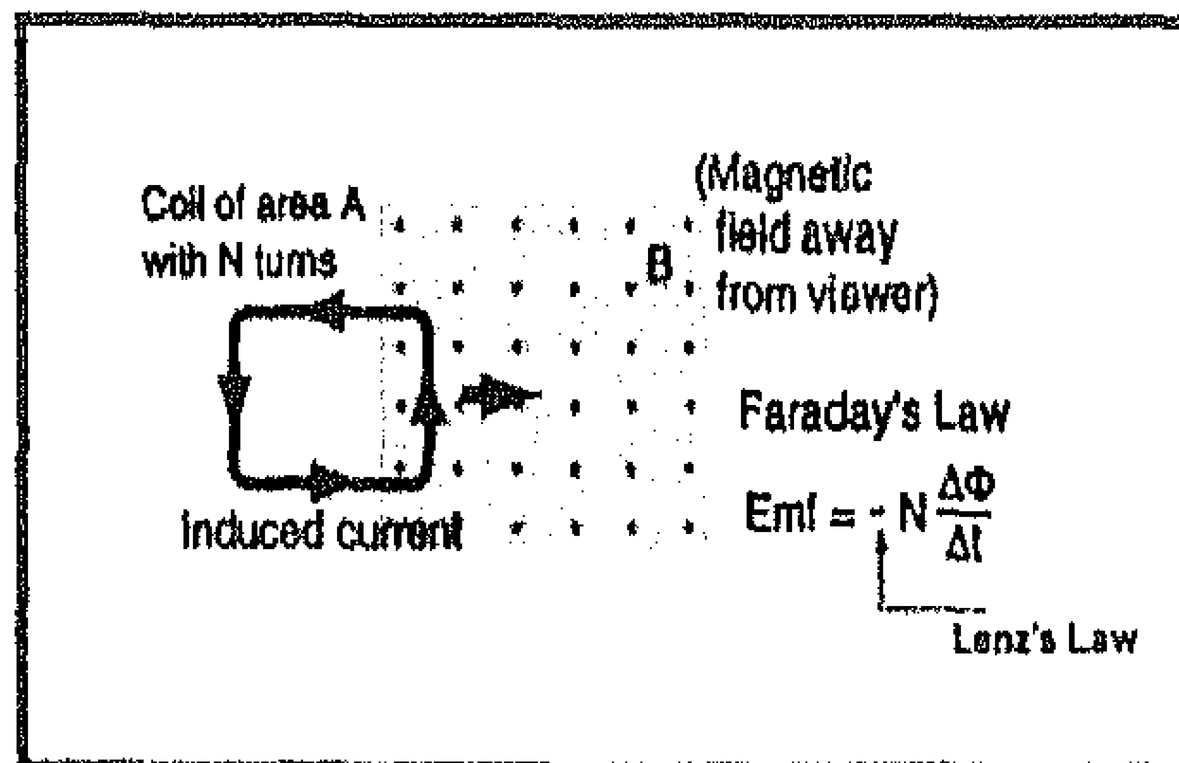
ويستخدم التحليل الكهربائي في تطبيقات لا حصر لها أهمها استخلاص كثير من العناصر الطبيعية من خاماتها كالألمنيوم والليثيوم والمنغنيز وغيرها الكثير. أما الاستخدام الثاني فهو في عملية الطلاء الكهربائي (electroplating) حيث يستخدم في ترسيب طبقات رقيقة من معادن معينة على سطوح معادن أخرى لأغراض الزينة أو حفظها من الصدأ (anodization). أما الاستخدام الثالث فهو لفصل الماء إلى مكوناته الهيدروجين والأوكسجين واستخدامها كوقود في بعض التطبيقات وكذلك في الحصول على أنواع مختلفة من الغازات. وتعتمد البطاريات في عملها على عكس ظاهرة التحليل الكهربائي حيث تستخدم بعض المحاليل للحصول على تيار كهربائي حيث يتم تحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية.



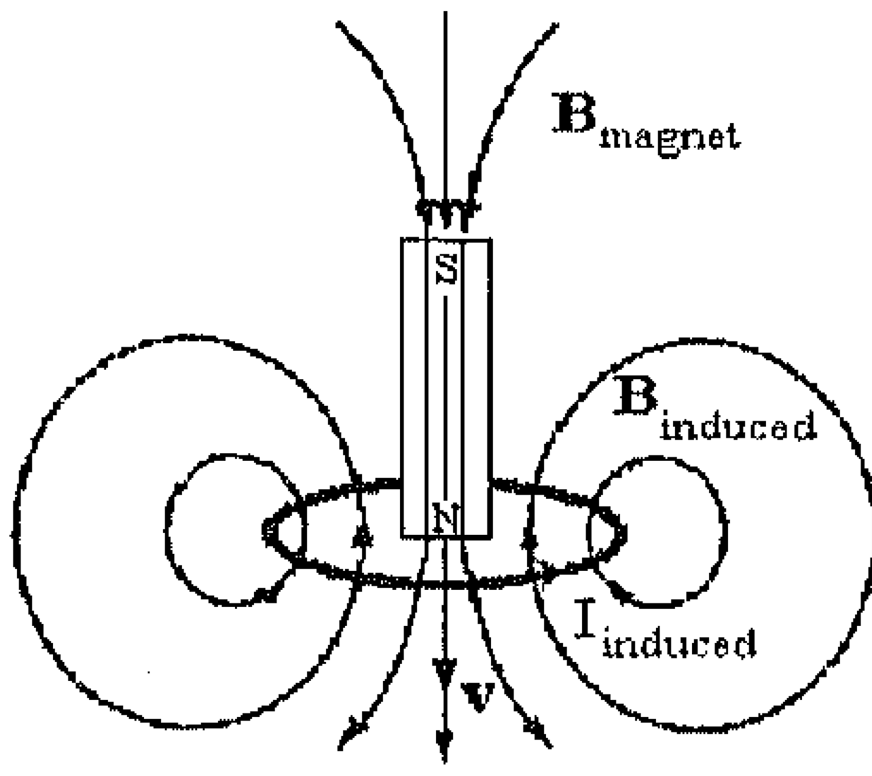
An Electrolytic Cell

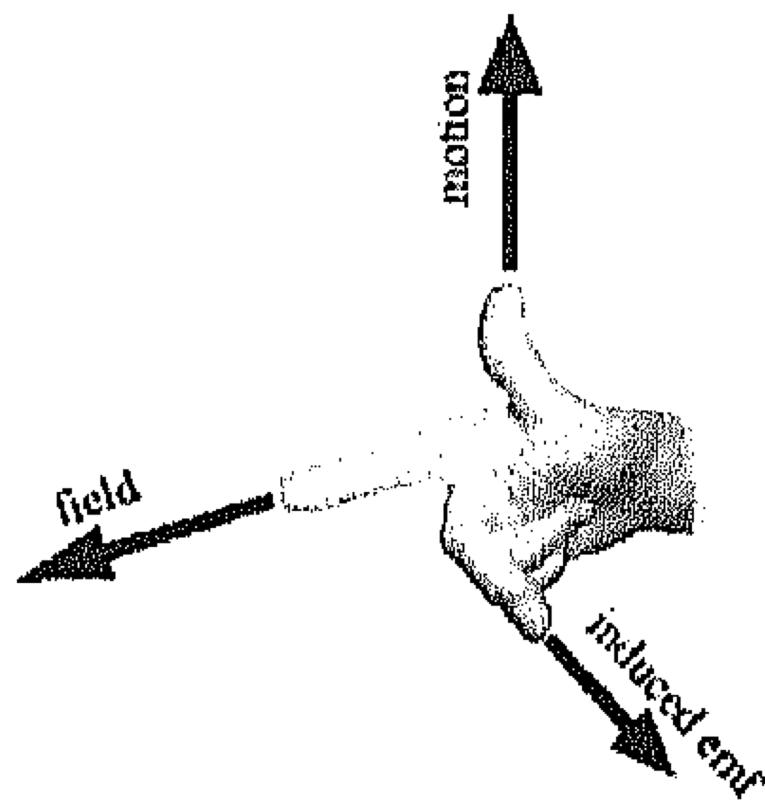
قانون فارادي للحث (Faraday's Law of induction)

إن أهم إسهامات فارادي هي في اكتشافه لأهم ظاهرة كهربائية في الهندسة الكهربائية ألا وهي الحث الكهرومغناطيسي وكان ذلك في عام 1831م. وينص قانون فارادي للحث على أن القوة الدافعة الكهربائية المتولدة (induced electromotive force) في أي دائرة كهربائية مغلقة مقاسة بالفولت تساوي معدل تغير الفيض المغناطيسي الذي يقطع تلك الدائرة مع الزمن (emf=dΨ/dt). لقد توصل فارادي إلى هذا القانون من خلال التجربة حيث يعتبرعالما تجريبيا من الطراز الأول فقد تبين له أنه عند تحريك سلك معدني في مجال مغناطيسي ثابت فإن فرقا في الجهد يتولد بين طرفي السلك ويتناسب فرق الجهد المتولد طرديا مع شدة المجال المغناطيسي وسرعة حركة السلك في الاتجاه العامودي



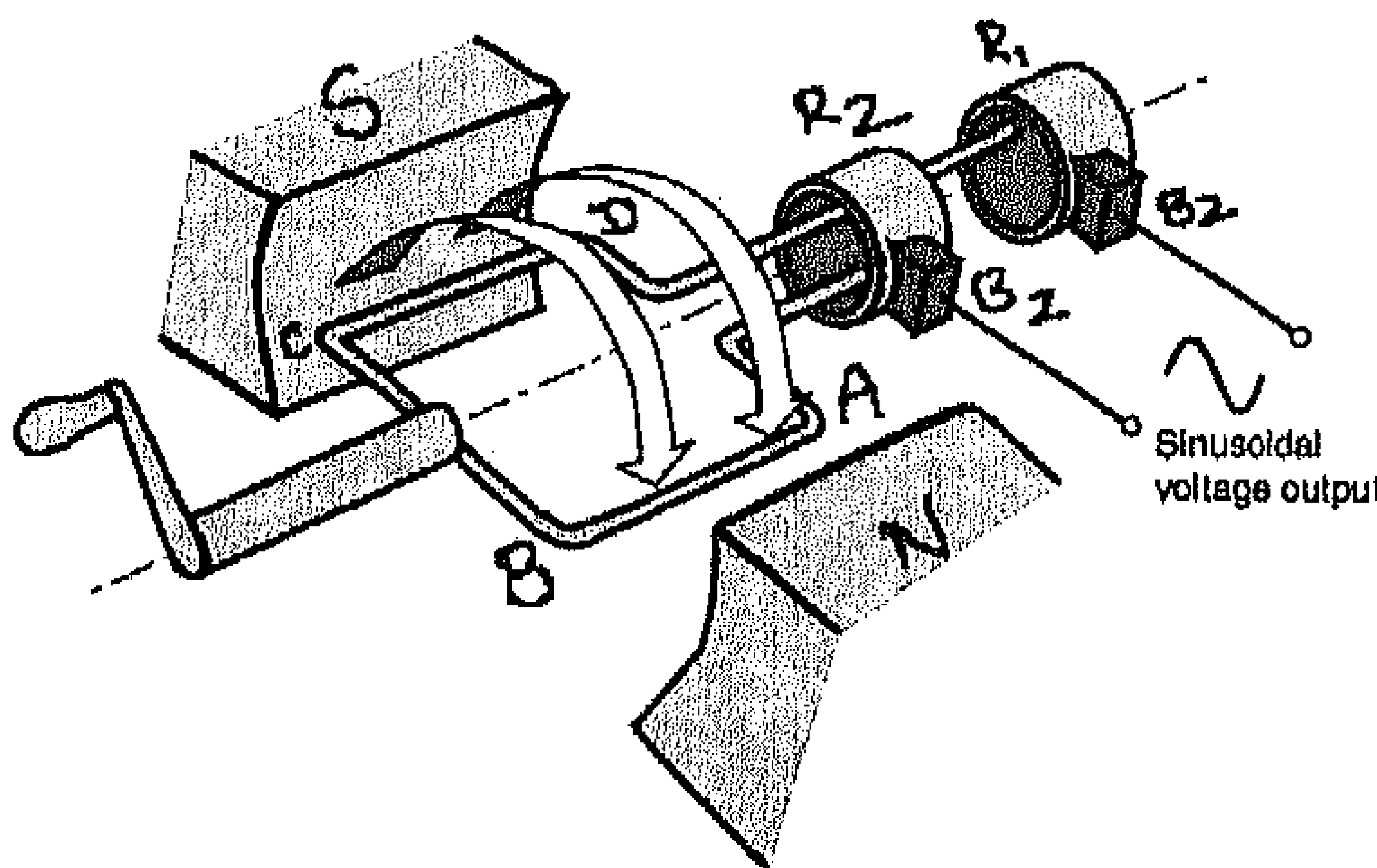
على اتجاه خطوط المجال المغناطيسي وكذلك طول السلك. ويطلق على الجهد المتولد بهذه الطريقة القوة الدافعة الكهربائية الحركية (motional electromotive force) وهي أساس عمل المولد الكهربائي. ويمكن الحصول على جهد كهربائي من خلال تثبيت الدائرة الكهربائية وتغيير المجال المغناطيسي مع الزمن ويطلق على الجهد المتولد بهذه الطريقة القوة الدافعة الكهربائية التحويلية (transformer electromotive force) وهي أساس عمل المحول الكهربائي. وقد قام العالم الأستوني هينريش لينز (Heinrich Lenz) في عام 1834م بتحديد اتجاه القوة الدافعة الكهربائية في ظاهرة الحث في قانونه المشهور (Lenz's Law) والذي ينص على أن اتجاه التيار المتولد في الدائرة الكهربائية نتيجة للحث يجب أن يكون بحيث ينتج مجالا مغناطيسيا حثيا (induced magnetic field) يعمل على تقليل المجال المغناطيسي الأصلي إذا كان متزايدا والعكس بالعكس ويمكن تحديد ذلك من خلال قاعدة أصابع اليد اليمنى المتعامدة . ويعتبر قانون فارادي أساس عمل المولد الكهربائي والذي لا يقل اختراعه أهمية عن اختراع البطارية وهو على العكس منها يمكنه توليد كميات كبيرة من الطاقة الكهربائية من الطاقة الميكانيكية والمتوفرة بكثرة في الطبيعة. ولقد تم تكريم فارادي وتخليد ذكره بإطلاق إسمه على وحدة السعة الكهربائية (capacitance) وهي الفاراد (Farad).





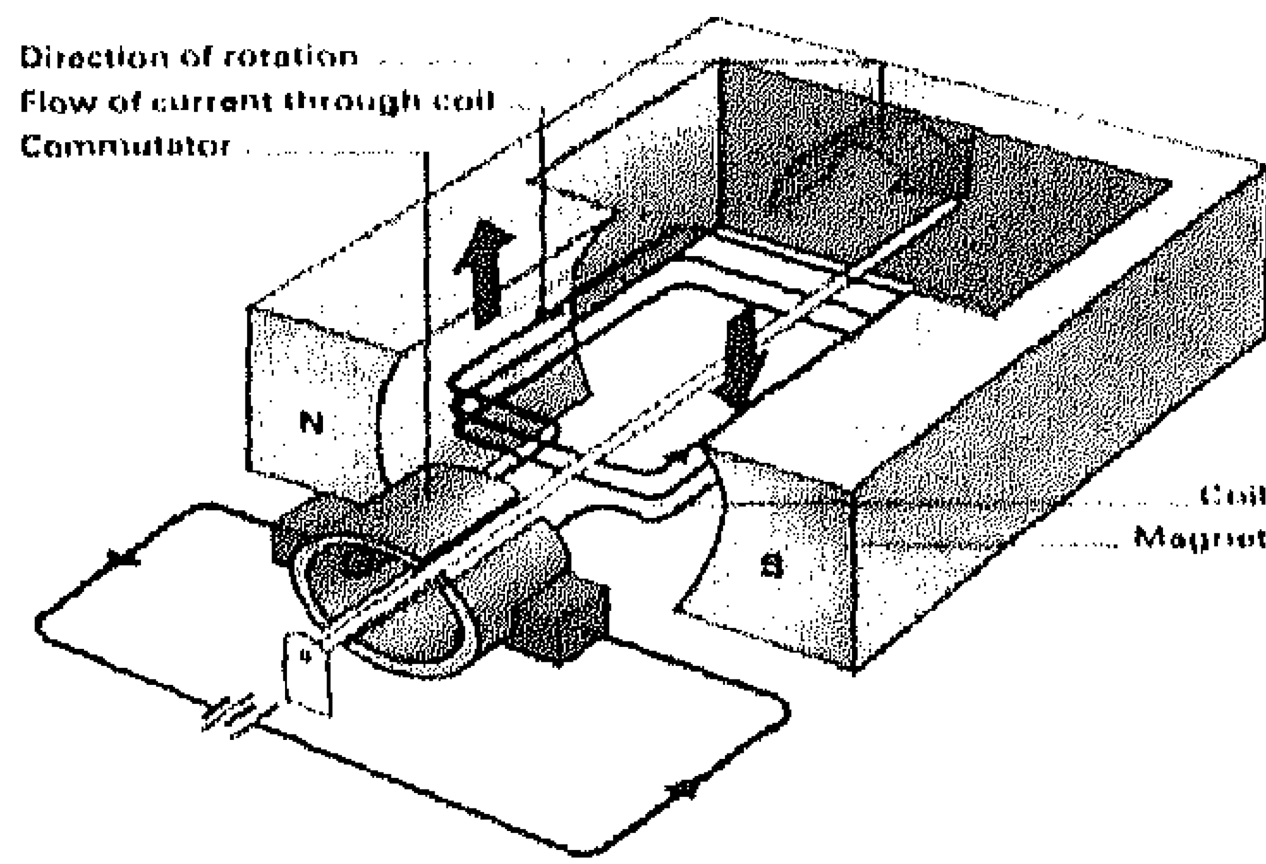
المولد والمحرك الكهربائي (Electric Generator & Motor)

يعود الفضل الأكبر في استغلال الظاهرة الكهربائية لما فيه مصلحة البشر إلى العالم الأنكليزي الشهير فارادي والذي برز في ذهنه سؤال بالغ الأهمية وهو إذا كان بإمكان التيار الكهربائي إنتاج مجال مغناطيسي حوله فلما لا يكون بالإمكان إنتاج تيار كهربائي من المجال المغناطيسي فكان أن اكتشف قانون الحث الكهرومغناطيسي وذلك في عام 1831م كما شرحنا ذلك آنفا. ويقوم المولد الكهربائي بتحويل الطاقة الحركية إلى طاقة كهربائية بينما تقوم البطارية بتحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية ولهذا فإنه بإمكان المولد الكهربائي توليد كميات كبيرة من الطاقة الكهربائية بسبب توفر الطاقة الميكانيكية بكثرة في الطبيعة كما في طاقة المياه والرياح أو من خلال المحركات الميكانيكية التي تعمل بشتى أنواع الوقود. وفي عام 1831م تمكن فارادي من توليد التيار الكهربائي من خلال تحريك قرص من النحاس بين قطبي مغناطيس طبيعي وسمي هذا المولد الكهربائي بقرص فارادي ولكن أداء هذا المولد البسيط كان سيئا لأن معظم الطاقة الكهربائية المولدة تضيع على شكل



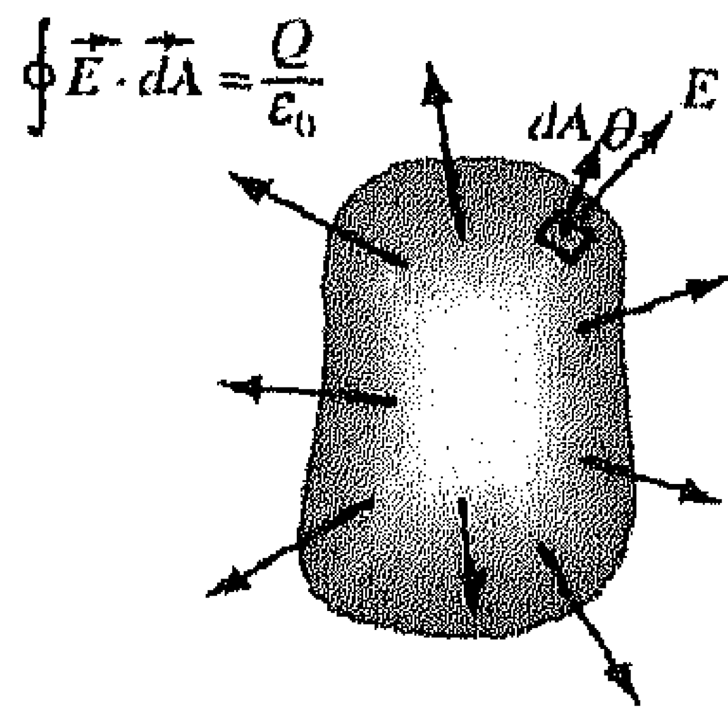
حرارة في القرص. وفي عام 1832م قام الفرنسي هبولايت بيكسي (Hippolyte Pixii) بتصنيع أول مولد تيار متناوب بدائي من خلال تحريك ملف من الأسلاك الكهربائية بين قطبي مغناطيس يدويا ويتم الحصول على الجهد المتولد من خلال فراشي تنزلق على حلقات مثبتة على محور الدوران. ويتناسب مقدار الجهد المتولد طرديا مع سرعة تدوير الملف وشدة المجال المغناطيسي وعدد لفات الملف.

أما المساهمة الثانية لفارادي فهو اختراع المحرك الكهربائي الذي يقوم بتحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة حركية وقد قام بتصنيع أول محرك بدائي في عام 1821م. والمحرك الكهربائي له نفس تركيب المولد الكهربائي ولكنه يعمل عكس عمله حيث يتم تمرير تيار كهربائي من مصدر خارجي في ملف المحرك المثبت بين القطبين المغناطيسين فيبدأ الملف بالدوران محولا الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية. وفي عام 1828م تمكن المخترع الهنغاري أنيوس جدليك (Ányos Jedlik) من تصنيع أول محرك كهربائي بشكل اقرب ما يكون للمحركات الحديثة بينما تمكن الفيزيائي الإنكليزي وليم ستورجيون (William Sturgeon) (1783-1850م) في عام 1832م من تصنيع أول محرك تيار مستمر باستخدام المبدل (commutator). وتوالت بعد ذلك التحسينات على المحركات الكهربائية إلى أن تم تصنيع أول محرك كهربائي تجاري يعمل بالتيار الثابت في عام 1837م على يد الأمريكي ثوماس ديفينبورت (Thomas Davenport). وفي عام 1888م تمكن المهندس الكهربائي الكرواتي المولد نيكولا تسلا (Nikola Tesla) من تصنيع أول محرك تيار متغير.



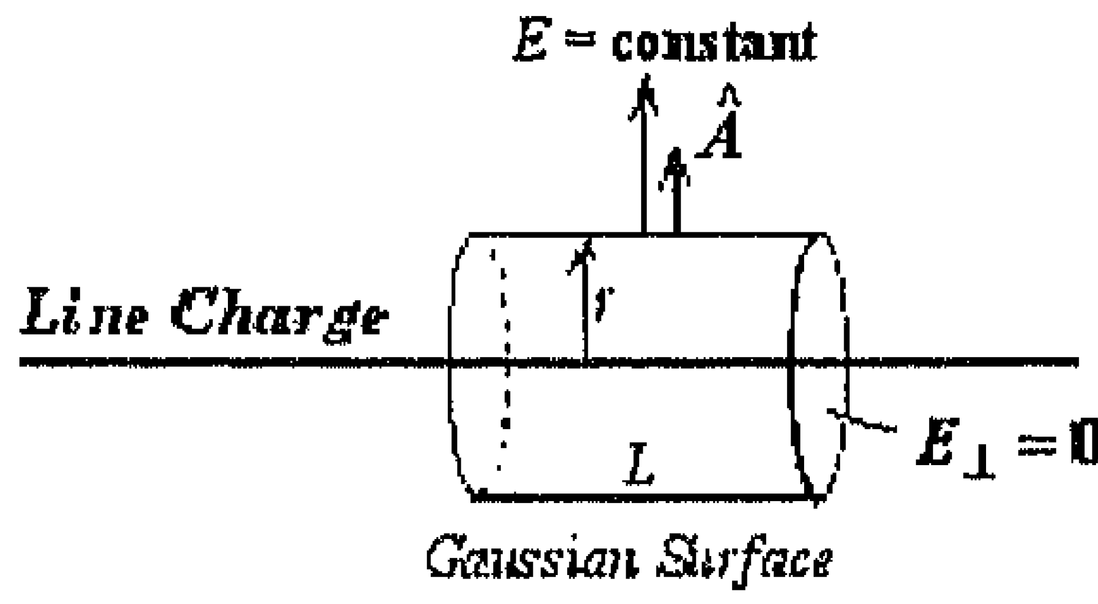
قانون جاوس (Gauss's Law)

تمكن الرياضي والفيزيائي الألماني الشهير كارل جاوس (Carl Friedrich Gauss) (1777-1855م) في عام 1835م من وضع قانون يوضح العلاقة العامة بين المجال الكهربائي وكمية الشحنات التي تولده حيث وينص القانون على أن تكامل المركبة العامودية لكثافة الفيض الكهربائي (electric flux density) على أي سطح مغلق يحيط بمجموعة من الشحنات الكهربائية (electric charges) يساوي مجموع قيم الشحنات التي يحتويها ذلك السطح. وله قانون مماثل للمجال المغناطيسي حيث ينص هذا القانون على أن تكامل المركبة العامودية لكثافة الفيض المغناطيسي (magnetic flux density) على أي سطح مغلق يساوي صفرا. وهذا يعني أنه لا وجود للشحنات المغناطيسية وأن كمية الفيض المغناطيسي التي تدخل أي سطح مغلق يجب أن تساوي كمية الفيض التي تخرج منه. لقد ساعد قانون جاوس العلماء في إيجاد كثافة الفيض الكهربائي عند أي نقطة في الفراغ لأشكال معينة من توزيع الشحنات والتي فيها نوعا ما من التماثل (symmetry) كالشحنات النقطية (point charge) والخطية (line charge) والسطحية (surface charge).



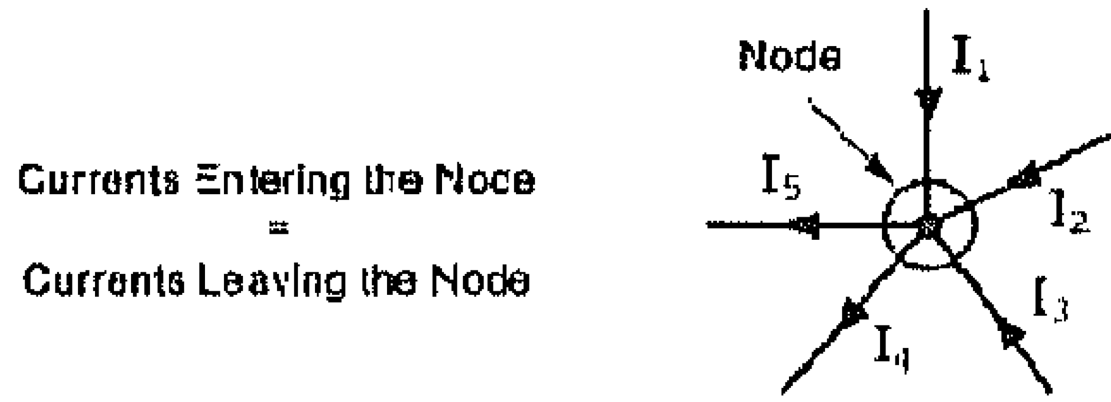
قانون حفظ الشحنة الكهربائية (Conservation of Electric Charge)

ينص قانون حفظ الشحنة الكهربائية على أن كمية الشحنة الكهربائية في أي نظام مغلق تبقى ثابتة بغض النظر عما يجري في داخله من تغيرات. واستنادا إلى هذا القانون يوجد ما يسمى بمعادلة الاستمرارية (continuity equation) والتي مفادها أن التيار الذي يخرج من أي نقطة يساوي سالب المشتقة الزمنية لكمية الشحنة الموجودة عند تلك النقطة. وتستخدم هذه المعادلة لحل كثير من المسائل في الكهرومغناطيسية وفي تحليل النبائط الإلكترونية.



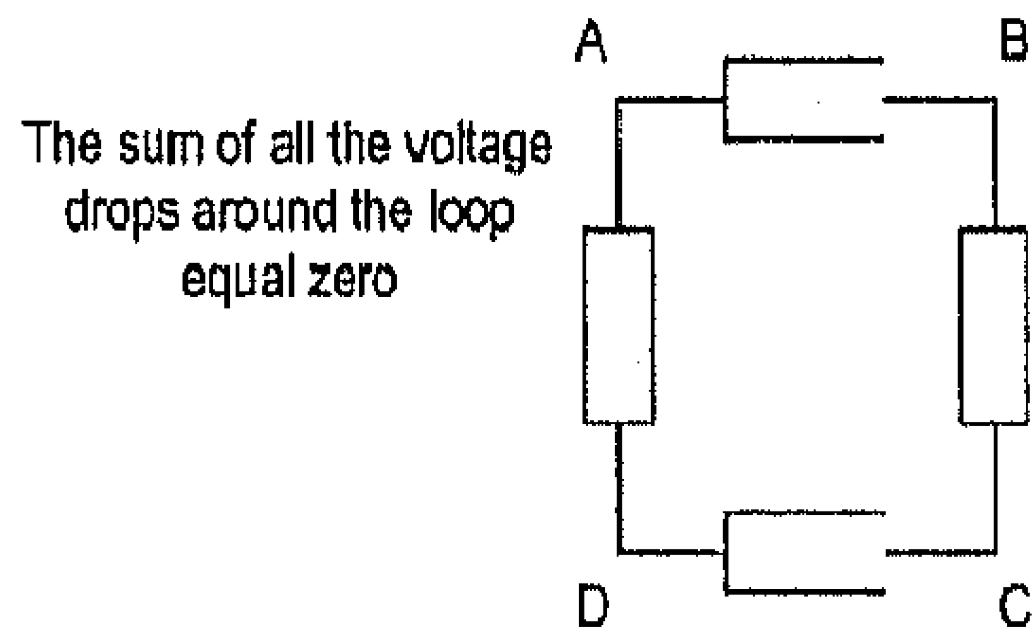
قوانين كيرتشوف للتيار والجهد (Kirchoff Current & Voltage Laws)

تمكن الفيزيائي الألماني جوستاف كيرتشوف (Gustav Robert Kirchoff) (1824-1887م) في عام 1845م من وضع أهم قانونين يستخدمان في تحليل الدوائر الكهربائية وهما قانون كيرتشوف للتيار وقانون كيرتشوف للجهد. فقانون كيرتشوف للتيار (Kirchoff current law) ينص على أن مجموع التيارات التي تدخل أي نقطة إلتقاء مجموعة من الأسلاك أو ما يسمى بالعقدة (node) يجب أن يساوي مجموع التيارات التي تخرج منها. أما قانون كيرتشوف للجهد (Kirchoff voltage law) فينص على أن مجموع الجهود الواقعة على عناصر أي دائرة كهربائية مغلقة أو ما يسمى بالعروة (loop) يجب أن يساوي الصفر مما يعني أن هنالك عناصر يجب أن يرتفع الجهد عليها وأخرى لا بد أن يهبط فيها الجهد وبهذا يكون مجموع الإرتفاعات في الجهد (voltage rises) يساوي مجموع الإنخفاضات في الجهد (voltage drops).



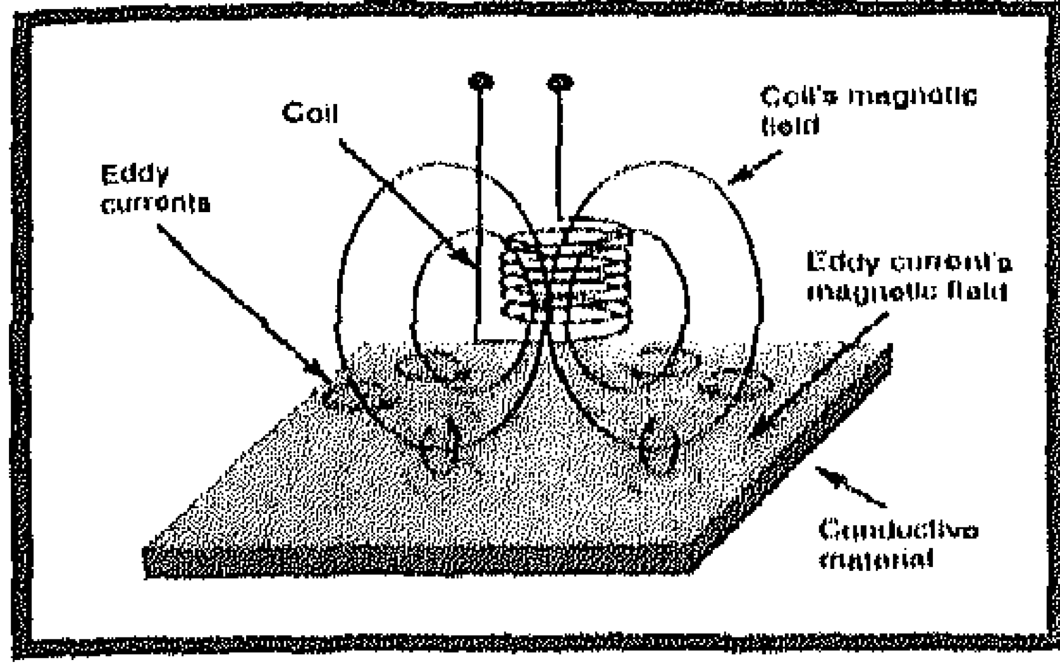
$I_1 + I_2 + I_3 = I_4 + I_5 = 0$

وتتكون الدوائر الكهربائية في العادة من ثلاثة عناصر سلبية وهي المقاومة والمواسعة والمحاثة. فالمقاومة (Resistance) يتناسب الجهد عليها طرديا مع التيار المار فيها حسب قانون أوم ويمثل ثابت التناسب قيمة هذه المقاومة (V=RI). أما المواسعة أو المكثف (Capacitance) فيتناسب الجهد عليها مع التكامل الزمني للتيار المار فيها ويمثل ثابت التناسب معكوس قيمة هذه المواسعة أو أن التيار يتناسب مع التفاضل الزمني للجهد (I= L dV/dt). وأما المحاثة (Inductance) فيتناسب الجهد عليها مع التفاضل الزمني للتيار المار فيها ويمثل ثابت التناسب قيمة هذه المحاثة (V= L dI/dt). وعادة ما يوجد في أي دائرة كهربائية مصدر واحد أو أكثر لتوليد الطاقة الكهربائية وقد صنف العلماء مصادر الطاقة الكهربائية إلى نوعين وهما مصدر الجهد (voltage source) والذي لا يتغير الجهد عند أطرافه مهما كانت قيمة التيار المسحوب ومصدر التيار (current source) والذي لا يتغير التيار المسحوب منه مهما كانت قيمة الحمل الموصول عليه وذلك في حالة كون هذه المصادر مثالية (ideal).

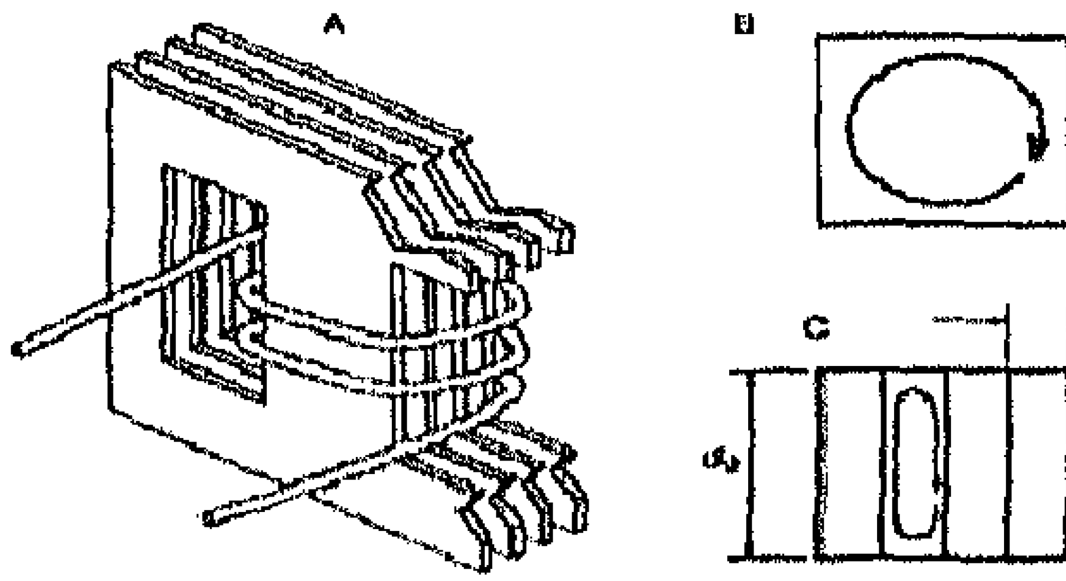


$V_{AB} + V_{BC} + V_{CD} + V_{DA} = 0$

التيارات الدوامة (Eddy Currents)



اكتشف الفيزيائي الفرنسي جين فوكولت (Jean Bernard Léon Foucault) (1819-1868م) ظاهرة التيارات الدوامة في عام 1851م عندما لاحظ أن الموصلات التي تتعرض لمجال مغناطيسي متغير ترتفع درجة حرارتها. ولقد كان من السهل عليه تفسير هذه الظاهرة باستخدام قانون الحث الذي اكتشفه فارادي في عام 1831م فالمجالات المغناطيسية المتغيرة تولد قوى دافعة كهربائية في داخل الموصل وبالتالي تولد تيارات كهربائية تكون على شكل دوائر لا حصر لعددها تحيط بخطوط المجال المغناطيسي الذي يولدها ويبدو شكل هذه التيارات إذا ما تخيلناها على شكل الدوامات المائية. وحسب قانون جول فإن هذه التيارات الكهربائية ستولد طاقة حرارية في داخل الموصل الذي يحملها



وتعتمد هذه الطاقة الحرارية المتولدة على أبعاد وشكل الموصل ومقاوميته (resistivity). إن التيارات الدوامة ظاهرة بالغة السوء لمصممي المولدات والمحركات والمحولات الكهربائية حيث أن أجسام هذه الآلات تبنى من الحديد نظرا لخصائصه المغناطيسية الممتازة وبما أن عمل هذه الآلات يتطلب وجود مجال مغناطيسي متغيير فإن تيارات دوامة كبيرة ستتولد في أجسامها الحديدية مما يتسبب في ارتفاع درجة حرارتها وتقليل كفاءتها. وللتغلب على هذه المشكلة يتم تصنيع أجسام الألات باستخدام عدد كبير من الشرائح الحديدية (laminated iron) بحيث يكون اتجاه المجال المغناطيسي موازيا لجسم الشريحة وليس عموديا عليه لتقليل طول مسارات التيارات الدوامه.

معادلات ماكسويل(Maxwell Equations)

تمكن عالم الفيزياء والرياضيات الاسكتلندي الشهير جيمس كلارك ماكسويل (James Clerk Maxwell) (1831-1879م) في عام 1860م من صياغة جميع القوانين المتعلقة بالمجالات الكهربائية والمغناطيسية وتفاعلهما مع بعضهما البعض ومع الشحنات والتيارات الكهربائية التي تنتجها في أربع معادلات تفاضلية. فالمعادلة الأولى حسب الترتيب في الصورة المرفقة هي قانون جاوس ولكن بشكل تفاضلي ومفادها أن أي شحنة كهربائية نقطية في الفضاء تولد حولها مجالا كهربائيا تنطلق خطوطه من مكان الشحنة. أما المعادلة الثانية فما هي إلا قانون جاوس للمغناطيسية ولكن بشكل تفاضلي ومفادها أن لا وجود للشحنات المغناطيسية ولذلك فإن خطوط المجال لا بد وأن تكون منغلقة على



نفسها. أما االمعادلة الثالثة فما هي إلا قانون فارادي للحث حيث قام ماكسويل بتحويله من شكله التكاملي إلى شكله التفاضلي أو النقطي ومفاد هذه المعادلة أن المجال المغناطيسي المتغير مع الزمن يولد حوله مجالا

كهربائيا تتناسب قيمته وتوزعه في الفضاء مع معدل تغير كثافة المجال المغناطيسي مع الزمن وكذلك اتجاهه في الفضاء. أما المعادلة الرابعة فهي شكل معدل لقانون أمبير فبعد أن قام ماكسويل بتحويله من شكله التكاملي إلى شكله التفاضلي أضاف حدا جديدا أطلق عليه اسم تيار الإزاحة (displacement current) وهذه الإضافة هي من أهم إسهامات ماكسويل في مجال الكهرومغناطيسية حيث مكنته من التنبؤ بوجود الأمواج الكهرومغناطيسية. وبإضافة تيار الإزاحة لمعادلة أمبير أصبح مفاد معادلة ماكسويل الرابعة أن التيار الكهربائي أو المجال الكهربائي المتغير مع الزمن يولد حوله مجالا مغناطيسيا تتناسب قيمته وتوزعه في الفضاء مع قيمة واتجاه التيار وكذلك مع معدل تغير شدة المجال الكهربائي مع الزمن واتجاهه في الفضاء.

لقد كتب ماكسويل معادلاته الأربع على شكل معادلات تفاضلية جزئية مطوله ومعقدة بلغ عددها عشرين معادلة وبعشرين متغير مجهول. وقد قام المهندس الكهربائي والرياضي أولفر هيفيصايد (Oliver Heaviside) (1850–1925م) بإعادة صياغتها في عام 1884م باستخدام حسبان المتجهات (Vector calculus) لتصبح بالشكل المبسط التي هي عليه الآن. ولا بد من القول بأن المهندس هيفيصايد له إسهامات كثير في مجال الهندسة الكهربائية وفي الرياضيات فهو الذي وضع نظرية خطوط النقل (transmission line theory) واخترع الكبل المحوري (coaxial cable) وحسن من كفاءة خطوط نقل إشارات التلغراف. وفي عام 1865م تمكن ماكسويل من خلال دمج المعادلات الأولى والثانية الحصول على معادلة تفاضلية من الدرجة الثانية وعند حل هذه المعادلة تبين له أن المجالات الكهربائية والمغناطيسية لا بد وأنها تنتشر على شكل موجات في الفضاء وبهذا فقد أثبت وتنبأ من خلال التحليل الرياضي البحت وجود ما يسمى بالموجات الكهرومغناطيسية. وتتكون الموجة الكهرومغناطيسية من مجال كهربائي وآخر مغناطيسي متعامدان في الفضاء ويتغيران بشكل دوري مع الزمن وتنتشر الموجة في الفضاء باتجاه يتعامد مع اتجاهي المجالين الكهربائي والمغناطيسي. وقد أكد ماكسويل في بحثه هذا على أن الضوء ما هو إلا شكل من أشكال الموجات الكهرومغناطيسية وأن هذه الموجات تنتشر في الأوساط المختلفة بسرعة تتحدد من قيم السماحية الكهربائية والنفاذية المغناطيسية للوسط. وقد تمكن من حساب سرعة الانتشار في الفضاء الحر من خلال حل هذه المعادلات ووجد أنها تساوي ثلاثمائة ألف كيلومتر في الثانية تقريبا. وقد تمكن الفيزيائيان الأمريكيان ألبرت ميكلسون (Albert Michelson) وإدوارد مورلي (Edward Morley) في عام 1887م من قياس سرعة الضوء في الفراغ ووجدوها مطابقة تماما لسرعة انتشار الموجات الكهرومغناطيسية التي تنبأ بها ماكسويل. ولماكسويل مساهمات كبيرة في مختلف المجالات وتكمن عبقريته في مقدرته الفذة على استخدام الرياضيات في صياغة مختلف أنواع الظواهر الفيزيائية وكذلك استنباط بعض الحقائق الفيزيائية من الصيغ الرياضية فله إسهامات بالغة الأهمية في علم الديناميكا الحرارية وحركة الغازات وفي علم التحكم وفي الضوء.

$$\nabla\cdot\vec{E}=\frac{\rho}{\varepsilon_0}=4\pi k\rho \qquad \oint\vec{E}\cdot d\vec{A}=\frac{q}{\varepsilon_0}$$

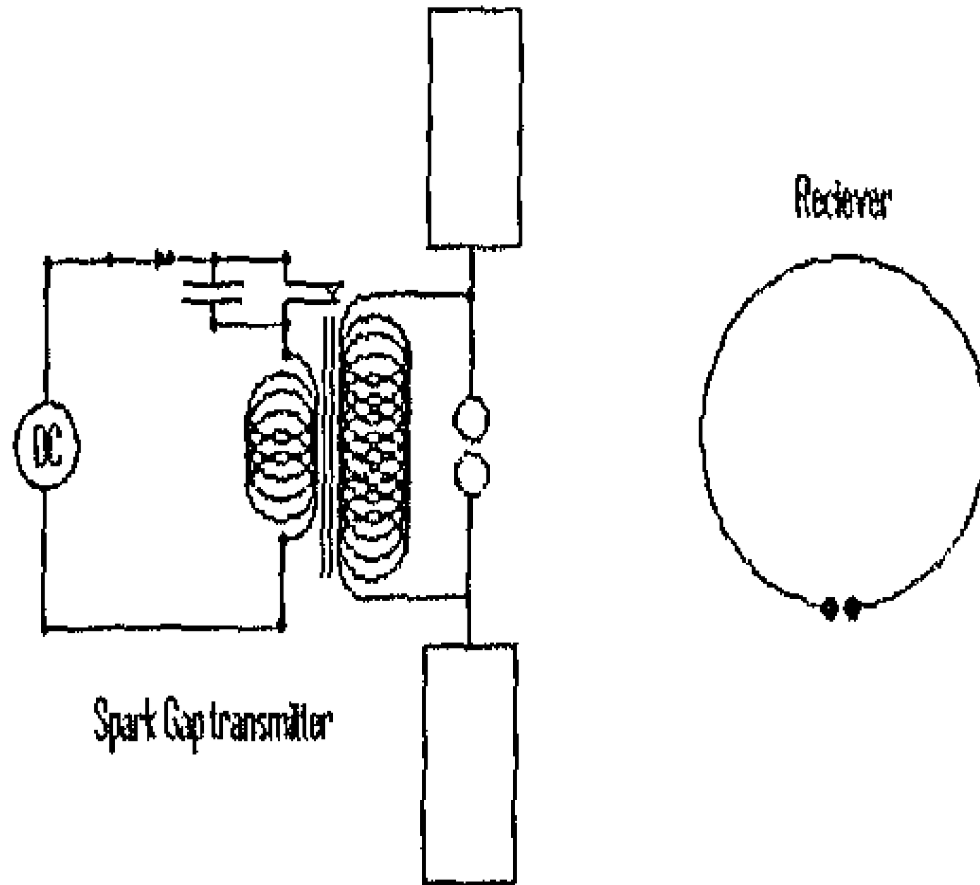
$$\nabla\cdot\vec{B}=0 \qquad \oint\vec{B}\cdot d\vec{A}=0$$

$$\nabla\times\vec{E}=-\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \qquad \oint\vec{E}\cdot d\vec{s}=-\frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\nabla\times\vec{B}=\frac{\vec{J}}{\varepsilon_0 c^2}+\frac{1}{c^2}\frac{\partial\vec{E}}{\partial t} \qquad \oint\vec{B}\cdot d\vec{s}=\mu_0 i+\frac{1}{c^2}\frac{\partial}{\partial t}\int\vec{E}\cdot d\vec{A}$$

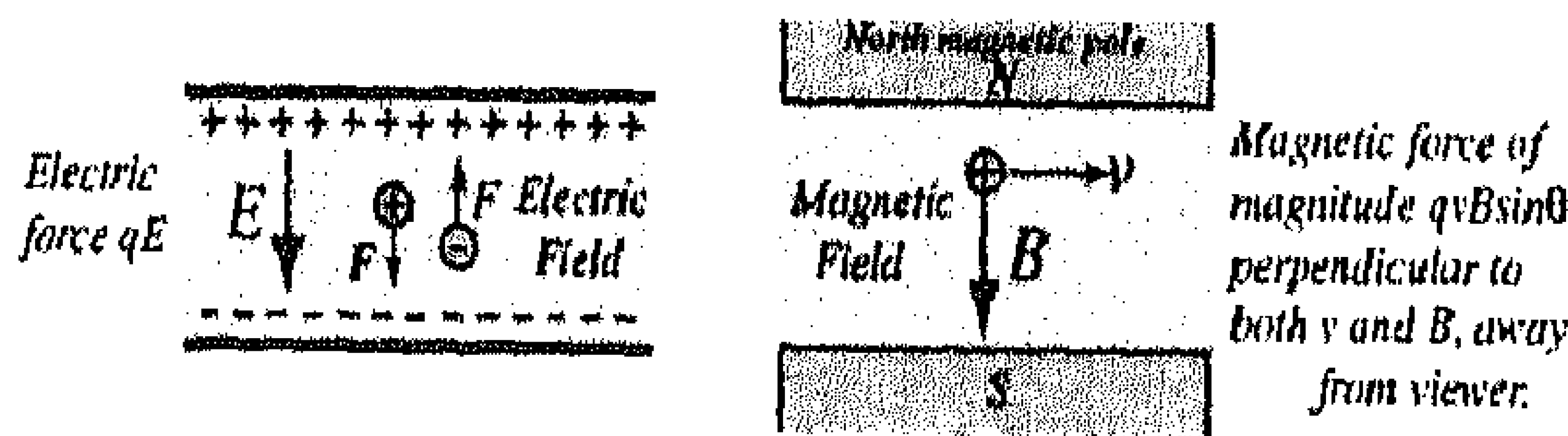
اكتشاف الأمواج الكهرومغناطيسية

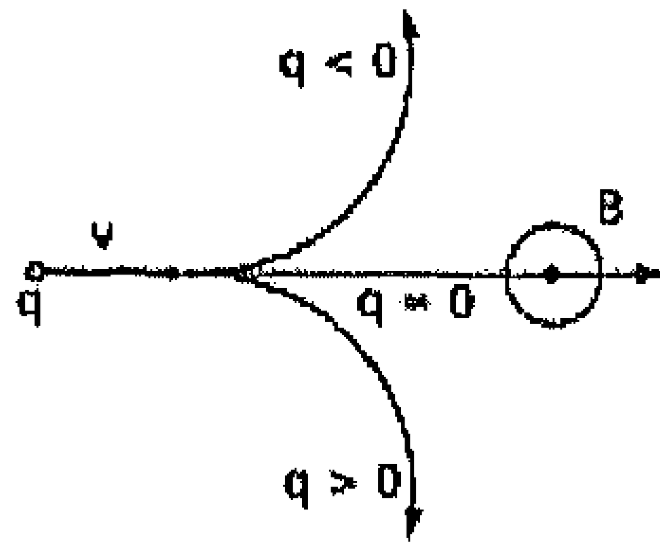
توفي ماكسويل في عام 1878م وذلك قبل أن تتحقق نبوءته بوجود الموجات الكهرومغناطيسية على يد عالم الفيزياء الألماني هينرتش هيرتز (Heinrich Hertz) (1857-1894م) وذلك في عام 1887م حيث تمكن من توليد الموجات الكهرومغناطيسية باستخدام أشكال بسيطة من الهوائيات وقد تم تكريم هيرتز بإطلاق اسمه على وحد التردد الهيرتز. يعد اكتشاف الموجات الكهرومغناطيسية من أعظم الاكتشافات التي حققها البشر على مدى تاريخهم وذلك بعد اكتشافهم وتوليدهم للطاقة الكهربائية وذلك لأنها سهلت بشكل كبير عملية نقل المعلومات إلى أي مكان على سطح هذه الأرض وحتى خارج حدودها. ومنذ أن صاغ ماكسويل قوانين الكهرومغناطيسية في معادلاته الأربع لم يتم إضافة إلا الشيء القليل إلى علم الكهرومغناطيسية النظري. أما في المجال التطبيقي فقد تم استخدام هذه المعادلات بشكل كبير من قبل المهندسين الكهربائيين لحل كثير من المسائل كانتشار الموجات في الأوساط المختلفة كخطوط النقل ومرشدات الموجات والألياف الضوئية وفي تصميم هوائيات الإرسال والإستقبال وفي تطبيقات أخرى لا حصر لها. ولقد استغل الإيطالي "ماركوني" هذا الاكتشاف العظيم وقام في عام 1895م بسلسلة تجارب لنقل المعلومات لاسلكيا وتكللت جهوده بالنجاح في عام 1899م حيث قام بإرسال أول رسالة تلغرافية لاسلكية عبر القنال الإنكليزي وتمكن كذلك في عام 1901م من إرسال رسالة تلغرافية لاسلكية عبر المحيط الأطلسي.



قانون لورنتز للقوة (Lorentz Force Law)

يعتبر قانون لورنتز للقوة أحد القوانين المكملة لمعادلات ماكسويل الأربع لحل مختلف المسائل في علم الكهرومغناطيسية ولقد ظهر هذا القانون بشكل غير مكتمل في أحد المعادلات التي تعامل معها ماكسويل في اشتقاقاته المختلفة. وفي عام 1892م تمكن الفيزيائي الهولندي الشهير هندرك لورنتز (Hendrik Antoon Lorentz) (1853-1928م) من وضع القانون بصيغته النهائية التي نستخدمها اليوم. ويحدد هذا القانون مقدار القوة التي تؤثر على شحنة كهربائية عند وجودها في مجال كهربائي سواء كانت هذه الشحنة ساكنة أو متحركة وكذلك القوة التي تؤثر على الشحنات الكهربائية المتحركة في داخل مجال مغناطيسي. فإذا ما وضعت شحنة كهربائية في مجال كهربائي سواء كانت ساكنة أو متحركة فإن المجال الكهربائي سيؤثر بقوة تساوي حاصل ضرب شدة المجال في قيمة الشحنة $(F = q E)$ ويكون اتجاه القوة بنفس اتجاه المجال إذا كانت الشحنة موجبة وعكسه إذا كانت سالبة. وبما أن الشحنة ستتحرك بنفس اتجاه القوة فإنها ستتسارع طبقا لقانون نيوتن الثاني $(F=ma)$ وستزداد طاقتها الحركية من خلال استمداد الطاقة من المجال الكهربائي. وإذا ما تم وضع الشحنة الكهربائية في مجال مغناطيسي فإن هذا المجال المغناطيسي سيؤثر بقوة على الشحنة فقط إذا كانت متحركة ويساوي مقدار القوة حاصل ضرب أربع كميات وهي كثافة المجال المغناطيسي وقيمة الشحنة وكذلك سرعتها وجيب الزاوية الواقعة بين اتجاه





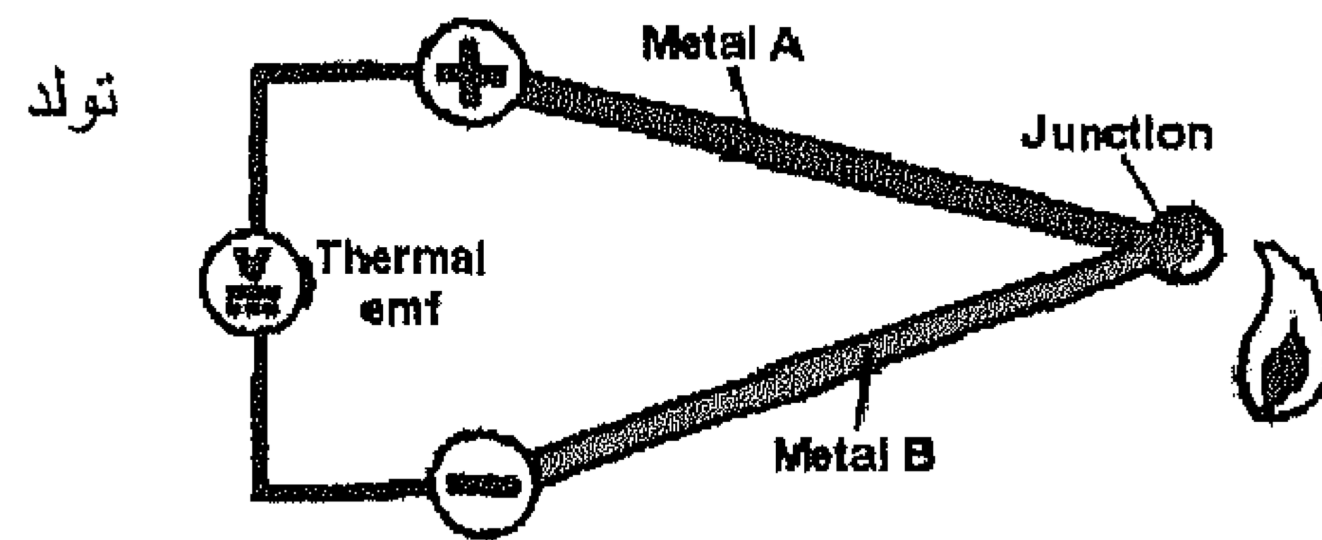
حركة الشحنة واتجاه المجال المغناطيسي ($F = q\ V\ B\ \sin\theta$). وأما اتجـاه القوة فإنه يتعامد مع اتجاه كل من السرعة والمجال حسب قاعدة اليـد اليمنـى للشحنه الموجبة وعكسها للشحنة السالبة. وبما أن اتجاه القوة عامودي علـى اتجاه حركة الشحنة فإن الشحنة ستبقى تتحرك بنفس سرعتها ولن تتسارع أبدا وعليه فإنها ستحتفظ بنفس طاقتها الحركية ويقتصر دور المجال المغناطيسـي على تغيير اتجاه حركة الشحنة. ويستخدم هذا القانون لتصميم أنواع مختلفة من الأجهـزة كـأنبوب الأشـعة المهبطية المستخدم في التلفزيونات وفي مولدات الأمواج الدقيقة والأجهزة الطبيـة والمسـارعات وغيرهـا. وللعالم لورنتز الفائز بجائزة نوبل مساهمات كثيرة في الفيزياء كتحويلاته الشهيرة المسـتخدمة فـي نظريـة النسبية (Lorentz Transformation).

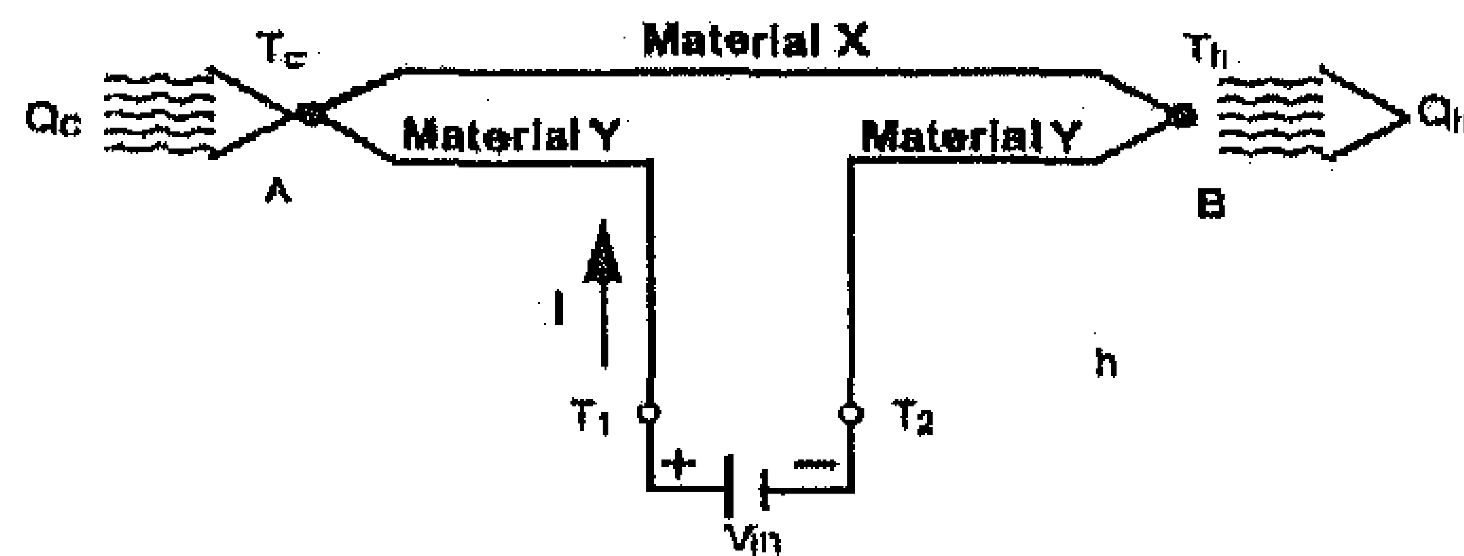
5-1 التأثيرات الكهربائية (Electric Effects)

إن كثيرا من التطبيقات في الهندسة الكهربائية وغيرها من التخصصات تعتمـد علـى ظـواهر أو تأثيرات كهربائية مختلفة تم اكتشاف معظمها في بداية عصر الكهرباء على يد علماء أفـذاذ كـان سـلاحهم الوحيد قوة الملاحظة في غياب الأجهزة المخبرية المعقدة المتوفرة بين أيدينا الآن. وسنشرح فيما يلي بعـض أهم التأثيرات الكهربائية ومجالات استخدامها في التطبيقات المختلفة وخاصة في المصوغات (transducers) والحساسات (sensors) المستخدمة في أجهزة القياسات الكهربائية.

التأثير الكهروحراري (Thermoelectric Effect)

اكتشف العالم الألماني ثوماس سيبك (Thomas Seebeck) (1770-1831م) فـي عـام 1821م التأثير الكهروحراري حيث وجد أن دائـرة مغلقـة مكونة من سلكين مصنوعين من معـدنين مختلفـين تولد مجالا مغناطيسيا حولها إذا كانـت نقطتـا إلتقـاء السلكين عند درجات حرارة مختلفـة. وقـد تمكـن الفيزيـائي الـدانيماركي هـانز أورسـتد Hans (Oersted) من تفسير هذه الظاهرة وعزاها لتولد جهد كهربائي بين العقدتين (nodes) وذلك على عكس ما كان يظن سيبك من أن مغناطيسا قد تكون نتيجة للتقاء المعدنين. وقد تم استخدام هـذه الظـاهرة فـي قيـاس درجات الحرارة بما يسمى بالمزدوجات الحرارية (Thermocouples). وقد تمكن العالم الفرنسي جين بيلتير (Jean Peltier) (1785-1845م) في نفس الفترة من اكتشاف عكس هذه الظاهرة فعند تمرير تيار كهربائي في الدائرة المذكورة فإن إحدى العقدتين تنـتج حرارة والأخرى تمتص الحـرارة أي تبـرد وعند عكس اتجاه التيار يحدث العكس ويمكن استخدام هذه الظاهرة كمضخة حرارية للتبريد أو التسخين وسميت هذه الظاهرة بتأثير بيلتير (Peltier effect). وفي عام 1851م تمكن العالم وليم ثومسون المشهور باسـم اللـورد كـيلفن (William

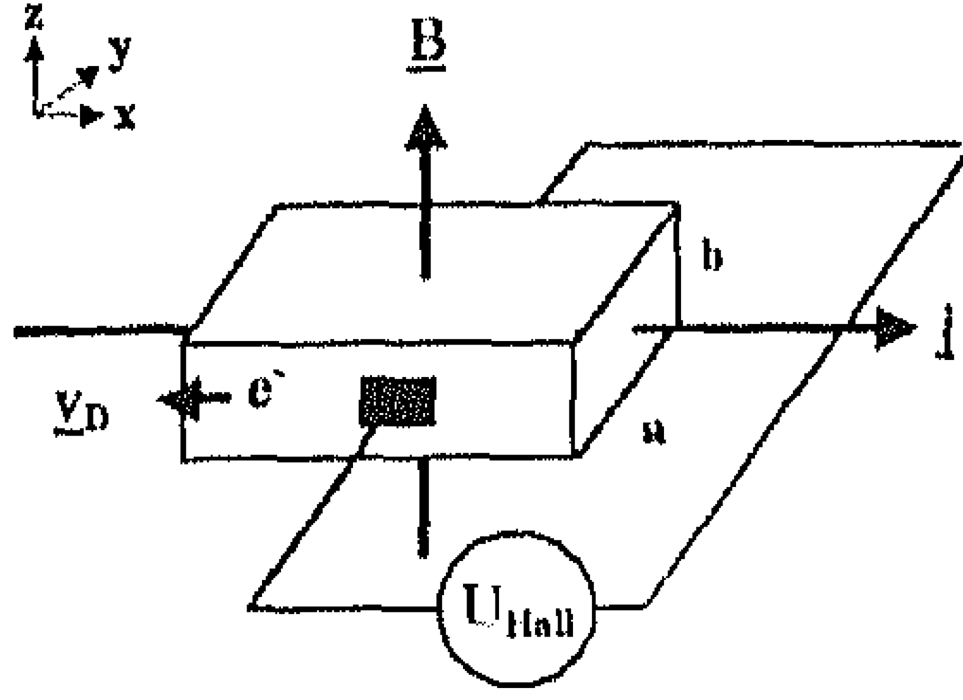




(Thomson) باكتشاف تأثير ثومسون (Thomson effect) والذي مفاده أن أي سلك يحمل تيارا كهربائيا قد يمتص أو يطلق حرارة إذا ما تعرض لاختلاف في درجة حرارة السلك على مدى طوله.

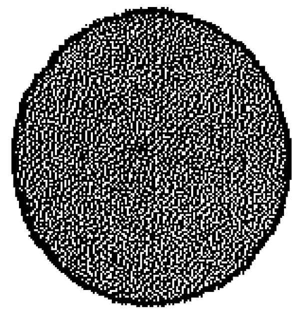
تأثير هول (Hall Effect)

أكتشف الفيزيائي الأمريكي إدون هول (Edwin Herbert Hall) (1855-1938م) في عام 1879م هذا التأثير المسمى باسمه عندما لاحظ أن جهدا كهربائيا قد تولد بين وجهي شريط معدني يحمل تيارا كهربائيا وذلك عند تسليط مجال مغناطيسي ثابت بشكل عامودي على اتجاه التيار. وقد وجد هول أن مقدار الجهد المتولد يتناسب طرديا مع حاصل ضرب التيار الكهربائي في كثافة المجال المغناطيسي ويعتمد ثابت التناسب على نوع مادة الشريط المعدني. ولهذه الظاهرة تطبيقات كثيرة في التقنيات الحديثة كقياس التيار الكهربائي وكثافة المجال المغناطيسي وفي أجهزة التحكم بالمحركات الكهربائية وكثير من أنواع الحساسات.



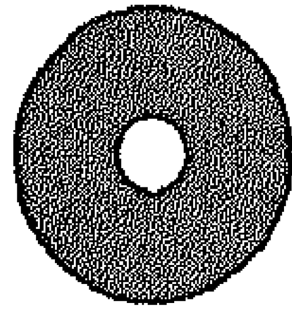
التأثير السطحي (Skin Effect)

لقد قد كان الرياضي والفيزيائي الإنكليزي السير هوراك لامب (Sir Horace Lamb) (1849-1934م) أول من اكتشف ظاهرة التأثير السطحي واشتق قوانينها للأسلاك دائرية المقطع وذلك في عام 1883م. وتحدث ظاهرة التأثير السطحي في الموصلات الحاملة للتيارات الكهربائية المتناوبه أو المتغيرة حيث تنزع هذه التيارات للتوزع في الأماكن القريبة من سطح الموصل مبتعدة عن مركزه حيث تكون كثافة التيار أكبر ما تكون عند السطح وتقل بشكل أسي (exponential) كلما ابتعدت عن السطح. ويعرف العمق السطحي (skin depth) بأنه المسافة المقاسة من سطح الموصل باتجاه مركزه والذي تهبط فيه كثافة التيار إلى 37 بالمائة من قيمته عند السطح وهو يتناسب عكسيا مع الجذر التربيعي للتردد وطرديا مع الجذر التربيعي لمقاومية (resistivity) مادة الموصل. ففي الموصلات النحاسية على سبيل المثال فإن العمق السطحي يبلغ 8.57 ملم عند 60 هيرتز و 0.66 ملم عند 10 كيلوهيرتز. إن هذه الظاهرة ذات أثر سيء عند نقل الإشارات الكهربائية ذات الترددات العالية حيث تزداد مقاومة هذه الأسلاك بشكل كبير مع زيادة التردد مما يزيد من كمية الطاقة المفقودة فيها ولذلك يستخدم المهندسون تقنيات متعددة للتغلب على المشاكل الناتجة عن هذه الظاهرة أهمها استخدام أسلاك مكونة من عدد كبير من الشعيرات المعزوله. ويوجد ظاهرة مماثلة ترفع من مقاومة الموصلات الحاملة للتيارات المتغيرة يطلق عليها اسم تأثير المجاورة



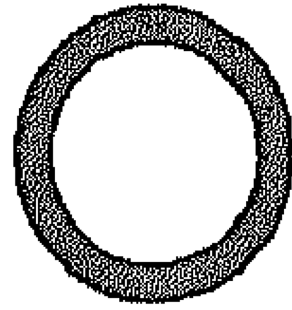
Cross-sectional area of a round conductor available for conducting DC current

"DC resistance"



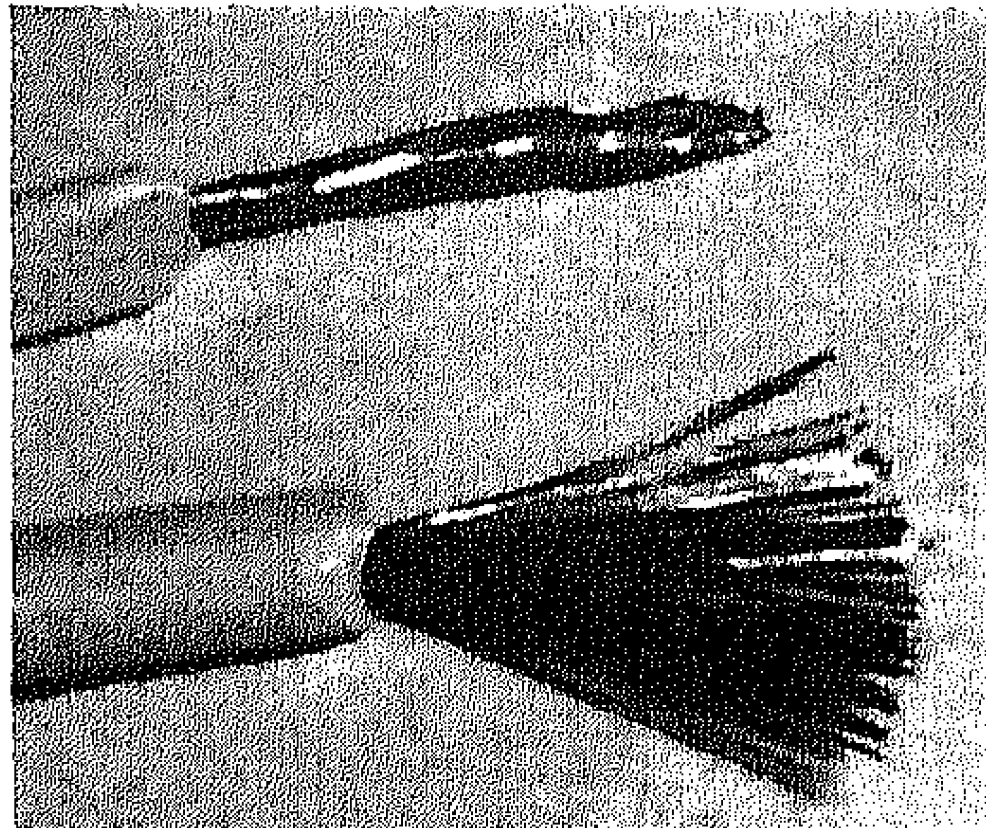
Cross-sectional area of the same conductor available for conducting low-frequency AC

"AC resistance"



Cross-sectional area of the same conductor available for conducting high-frequency AC

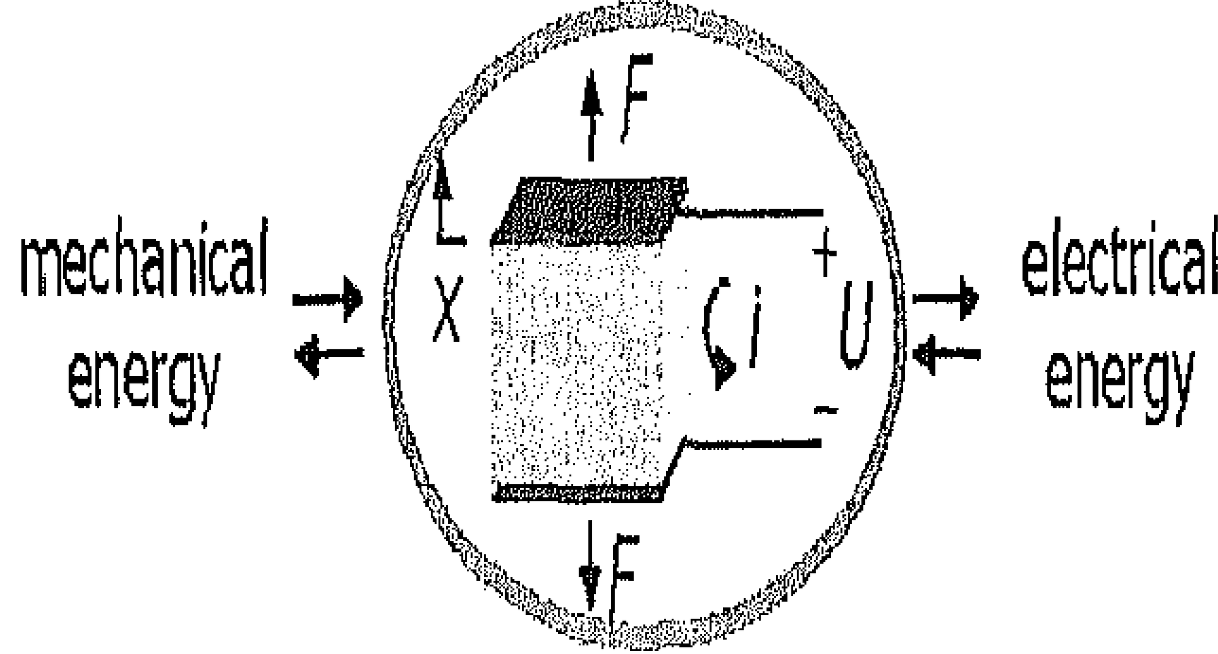
"AC resistance"



(proximity effect) وتحدث هذه الظاهرة عند وجود عدة موصلات متجاورة تحمل تيارات متغييرة فتعمل على حصر التيارات في مساحة صغيرة من المساحة الكلية لمقطع الموصل.

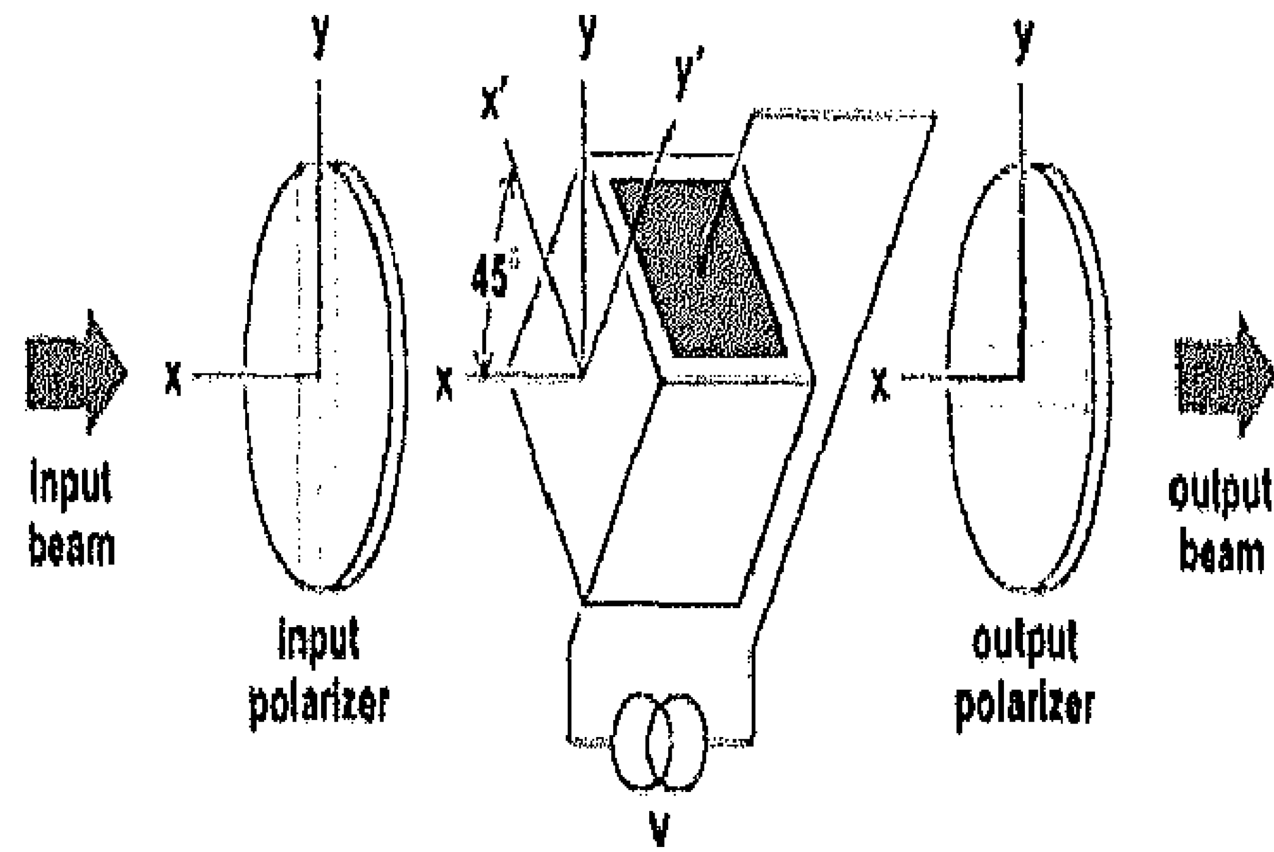
التأثير الكهروضغطي (Piezoelectric Effect)

التأثير الكهروضغطي هو قدرة بعض المواد وخاصة ذات البنية البلورية في توليد فرق جهد كهربائي بين أسطحها وذلك عند تسليط قوة ضاغطه على هذه الأسطح. وعكس هذا التأثير يمكن أن يحصل في هذه المواد فعند تسليط جهد كهربائي بين أسطح هذه المواد فإن أبعادها تتغير أو تتشوه. وعلى الرغم من أن هذه الظاهرة قد أشير لها من قبل عدة علماء ابتداء من منتصف القرن الثامن عشر إلا أن أول من قام بإثباتها مخبريا هو الفيزيائي الفرنسي بيري كوري (Pierre Curie) وزوجته ماري كوري (Maria Curie) وذلك في عام 1880م. ولهذا التأثير استخدامات كثيرة جدا بالغة الأهمية في التقنيات الحديثة كما في توليد وكشف الموجات الصوتية وفوق الصوتية (Ultrasound) وفي توليد الجهد العالي (high voltage) كما في الولعات (Piezoelectric Ignition Systems) وفي الحساسات (sensors) وفي الموازين الدقيقة وفي المذبذبات والمهتزات البلورية (crystal oscillators & multivibrators) وفي الساعات. ويعتبر الكوارتز من أهم المواد الطبيعية التي تبدي التأثير الكهروضغطي إلى جانب مواد طبيعية أخرى كالتوباز وبعض الأملاح والسكاكر والمواد السيراميكية.



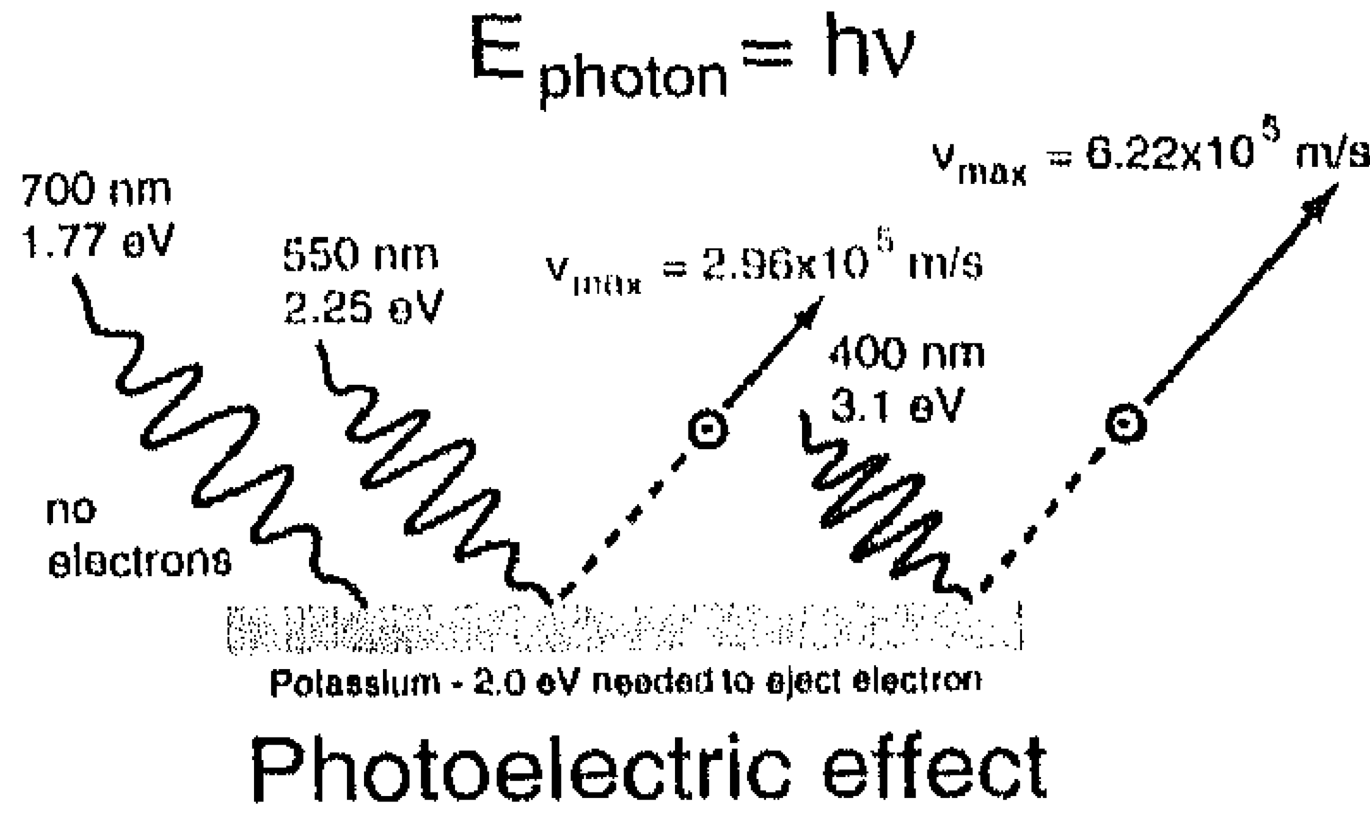
التأثير الكهروضوئي (Electro optic Effect)

يتعلق التأثير الكهروضوئي بظواهر تتغير فيها الخصائص الضوئية لبعض المواد نتيجة لتسليط مجالا كهربائيا عليها ومن هذه الخصائص معامل الإمتصاص (Absorption Coefficient) ومعامل الإنكسار(Refractive Index). وهنالك أنواع كثيرة من هذا التأثير كتأثير فرانس- كليدش(Franz-Keldysh effect) والذي يتأثر به معامل إمتصاص بعض المواد شبه الموصلة نتيجة لتسليط مجال كهربائي عليها وكتأثير كير (Kerr effect) والذي يتأثر به معامل إنكسار بعض المواد شبه الموصلة بمربع شدة المجال الكهربائي المسلط عليها. وتستخدم هذه التأثيرات في تطبيقات كثيرة أهمها في مجال الإلكترونيات الضوئية (optoelectronics) كما في المعدلات والكاشفات الضوئية (detectors & modulators) المستخدمة في أنظمة الاتصالات الضوئية.



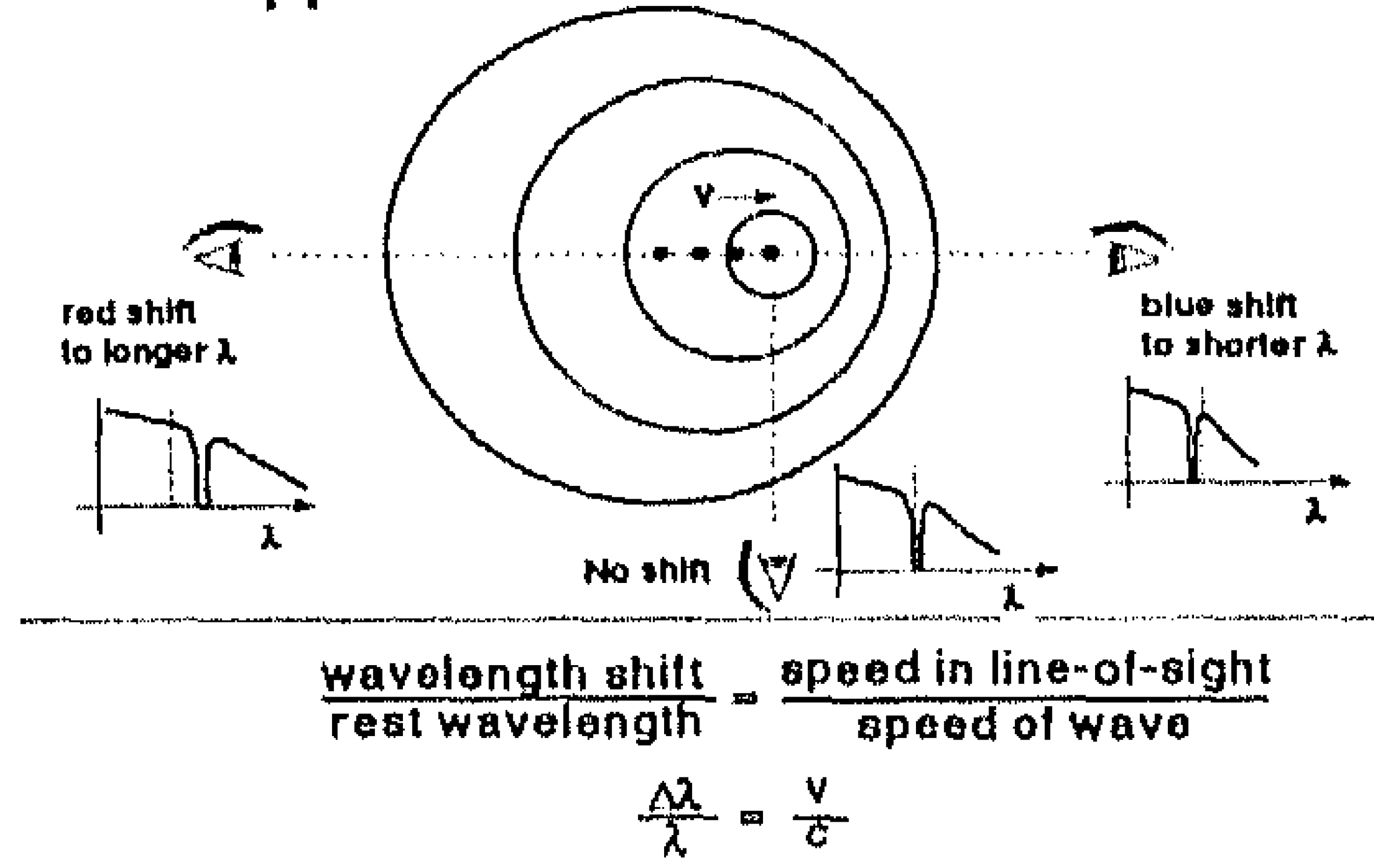
التأثير الكهروفوتوني (Photoelectric Effect)

أول من اكتشف ظاهرة التأثير الكهروفوتوني هو الفيزيائي الألماني هينـــرتش هيرتـــز (Heinrich Hertz) أثناء إجراء تجاربه التي تتعلق بتوليد الموجات الكهرومغناطيسية وذلك في عام 1887م ولقد ســميت هذه الظاهرة باسمه لفترة من الزمن. ومفاد هــذه الظاهرة أنه عند تسليط أمواج كهرومغناطيســية على أسطح المعادن فإن إلكترونات تنبعــث مــن هذه الأسطح إذا ما زاد ترددها عن حد معــين . ولقد قام عدد كبير مــن العلمـــاء بدراســة هــذه الظاهرة ولإيجاد تفسير مقنع لها أمثال الفيزيـــائي الإنكليزي جوزيف طومســون(Joseph John Thomson) و الفيزيائي والمهندس الكهربائي الكرواتـــي نيكـــولا تيســـلا (Nikola Tesla). ولقـــد تمكـــن الفيزيائي الشهير ألبرت أينشتاين (Albert Einstein) (1879-1955م) في عام 1905م من تفســير هــذه الظاهرة بعد أن تبين له أن الضوء وغيره من الموجات الكهرومغناطيسية يتكون من سيل من الفوتونات التـــي تعتمد كمية الطاقة فيها على تردد الموجة وإذا ما زادت طاقة الفوتون عن حد معين فـــإن بإمكانهـــا اقـــتلاع الإلكترونات من مداراتها فتنبعث خارجة من أسطح المعادن.



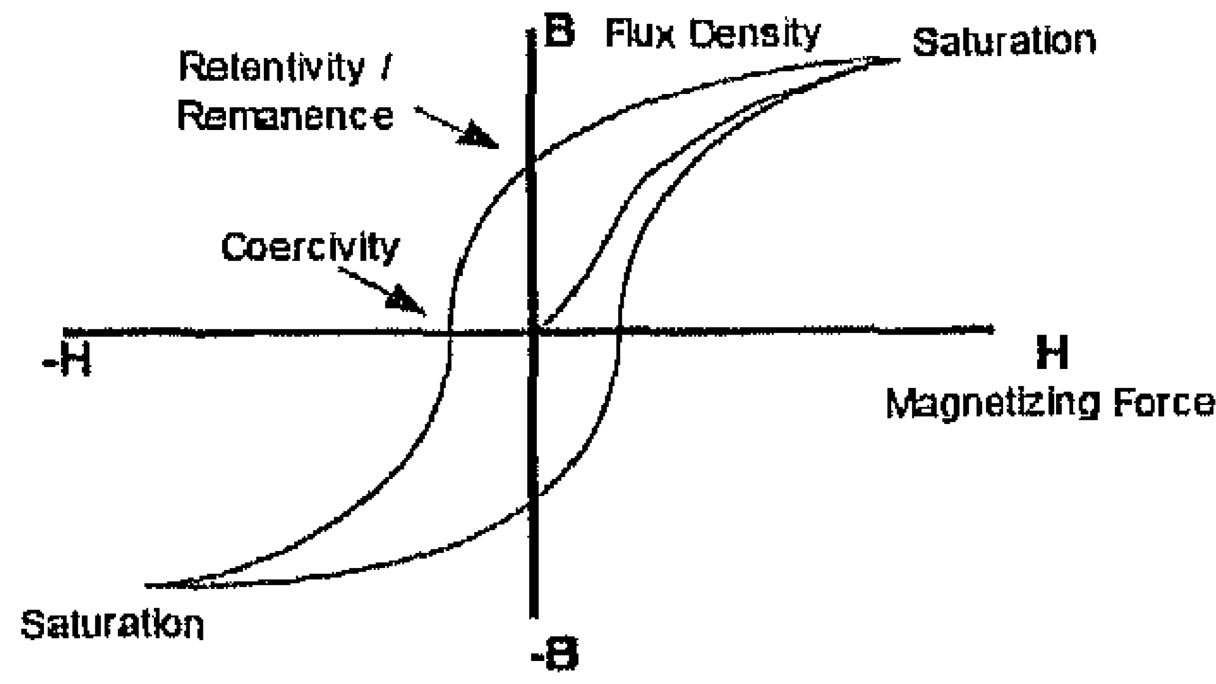
تأثير أو إزاحة دوبلر (Doppler Effect or Shift)

إن أول من أشار إلى تأثير دوبلر هو الفيزيائي النمساوي جريستين دوبلـــر (Christian Doppler) في مقالة حول تغير لون الضوء القادم من بعض النجوم عن لونه الطبيعي . ومفاد هذا التـــأثير أن تردد الموجة الكهرومغناطيسية المرتـــدة عـــن الهدف المتحرك قد يزيد أو ينقص عـــن تـــردد الموجة المرسلة بمقدار يتناسب طرديا مع مركبة سرعة الهدف الموازية لاتجـــاه ســـير الموجـــة. فالموجة المرتدة يزداد ترددها إذا كـــان الهـــدف يقترب من المصدر الذي أطلق الموجـــة ويقـــل ترددها إذا كان الهدف يبتعد عن المصدر. ومن الواضح أن سرعة الهدف لا يمكن تحديدها بشكل مطلـــق إلا في حالة واحدة وهي إذا كان الهدف يتحرك بشكل مباشر نحو الهدف أما إذا كان يتحرك بزاوية عاموديـــة أو مائلة على الخط الواصل بين الهدف وموقع المصدر فإنه من غير الممكن تحديد السرعة المطلقة. ولا يقتصر تأثير دوبلر على الموجات الكهرومغناطيسية بما فيها الضوء بل تظهر كذلك في حالـــة الموجـــات الصـــوتية والمائية. ويستخدم تأثير دوبلر في تطبيقات لا حصر كقياس سرعة النجوم والمجرات وقياس سرعة الأجســـام المتحركة باستخدام الرادار وغير ذلك.



ظاهرة التخلفية (Hysteresis)

تحدث ظاهرة التخلفية في كثير من المواد والدوائر الكهربائية وعلى الرغم من تأثيرها السلبي في بعض التطبيقات إلا أنها ذات فائدة كبيرة في تطبيقات أخرى. ومفاد هذه الظاهرة أن المواد والدوائر التي تمتلك مثل هذه الخاصية لها ذاكرة (memory) بحيث أن خرجها (output) لا يعتمد فقط على القيمة الحالية لدخلها (input) بل أيضا على تاريخ القيم السابقة للدخل. ففي المواد الفيرومغناطيسية كالحديد على سبيل المثال فإن قيمة كثافة الفيض المغناطيسي تعتمد على الطريقة التي يتم بها تغيير شدة المجال المغناطيسي



فعند زيادته تتحرك قيم الكثافة على منحنى يختلف عن المنحنى الذي تتبعه عند نقصانه مكونة ما يسمى بالأنشوطة التخلفية (hysteresis loop). ومن الواضح من الأنشوطة التخلفية للحديد المبينة في الشكل المرفق أنه يمكنه أن يحتفظ بمغناطيسيته بعد إزالة المجال المغناطيسي المسلط عليه ولذلك يمكن استخدامه في أنظمة حفظ المعلومات كما في الأشرطة والأقراص المغناطيسية.

الفصل الثاني

الموجات الكهرومغناطيسية والهوائيات وخطوط النقل

2-1 تمهيد

إن من أعظم الاكتشافات التي حققها البشر على مدى تاريخهم بعد اكتشافهم وتوليدهم للطاقة الكهربائية هو اكتشافهم للموجات الكهرومغناطيسية. ويعود الفضل في ذلك لعالم الفيزياء الاسكتلندي الشهير جيمس كلارك ماكسويل والذي تكمن عبقريته في مقدرته الفذة على استخدام الرياضيات في صياغة مختلف أنواع الظواهر الفيزيائية وكذلك استنباط الحقائق الفيزيائية من الصيغ الرياضية. لقد تمكن ماكسويل في عام 1860م من صياغة جميع القوانين المتعلقة بالكهربائية والمغناطيسية وتفاعلهما مع بعضهما البعض في أربع معادلات تفاضلية. ولم يتوقف الأمر عند هذا الحد بل استطاع من خلال حل هذه المعادلات التنبؤ بوجود ما يسمى بالموجات الكهرومغناطيسية والتي تم التحقق من وجودها وإيجاد طرق لتوليدها على يد عالم الفيزياء الألماني هينرتش هيرتز (Heinrich Hertz) وذلك في عام 1887م. ومن الجدير بالذكر أنه لولا تطور علوم الرياضيات وخاصة علمي التفاضل والتكامل لما كان بإمكان ماكسويل صياغة قوانين الكهرباء والمغناطيسية بهذا الشكل المميز ولما كان بإمكانه التنبؤ بوجود الموجات الكهرومغناطيسية. لقد سهلت الموجات الكهرومغناطيسية عملية نقل مختلف أنواع المعلومات بطريقة لاسلكية (wireless) إلى أي مكان على سطح هذه الأرض بل وتعداها إلى الفضاء الخارجي . فبعد سنوات قليلة من اكتشاف وتوليد هذه الموجات بدأ ظهور كثير من الأنظمة اللاسلكية فظهر التلغراف اللاسلكي في عام 1900م ومن ثم البث الراديوي في عام 1918م والبث التلفزيوني في عام 1935م.

ولولا اكتشاف الموجات الكهرومغناطيسية لبقي البشر مقيدين في نقل معلوماتهم المختلفة بالقنوات السلكية التي تحتم عليهم التواجد في أماكن محددة حيث توجد أطراف هذه الأسلاك كما هو الحال مع الهواتف السلكية. لقد مكنت هذه الموجات بناء انظمة اتصالات تكون فيها المرسلات ثابتة والمستقبلات متحركة أو بالعكس أو يكون كليهما متحركا وهذا لا يمكن إنجازه باستخدام القنوات السلكية إلا على نطاق ضيق جدا. ولذلك أصبح الاتصال ممكنا مع السفن وهي في عرض البحار والطائرات وهي في جو السماء والمركبات أين ما كان موقعها والأشخاص وهم في أي واد أو جبل يهيمون. بل أصبح بالإمكان باستخدام هذه الموجات مشاهدة صور في غاية الوضوح لأسطح كواكب المجموعة الشمسية من خلال كميرات مثبتة على مركبات فضائية وترسل هذه الصور وغيرها من المعلومات من على بعد مئات الملايين من الكيلومترات. وباستخدام هذه الموجات أصبح بإمكان البشر التحكم عن بعد بمختلف أنواع الأجهزة والمعدات الموجودة في البيوت والمكاتب والمصانع وكذلك في الأقمار الصناعية والمركبات الفضائية والطائرات والصواريخ. ومع التقدم المذهل في مجال الإلكترونيات والإستغلال الأمثل لترددات الطيف الكهرمغناطيسي بدأ التحول كليا من القنوات السلكية إلى القنوات اللاسلكية لنقل إشارات المعلومات والتحكم في مختلف المجالات.

2-2 معادلات ماكسويل والمعادلة الموجيه (Wave Equation)

ذكرنا في الباب الأول أن عالم الفيزياء والرياضيات الاسكتلندي الفذ جيمس كلارك ماكسويل (James Clerk Maxwell) (1831-1879م) قد تمكن في عام 1860م من صياغة جميع القوانين المتعلقة بالمجالات الكهربائية والمغناطيسية وتفاعلهما مع بعضهما البعض ومع الشحنات والتيارات الكهربائية التي تنتجها في أربع معادلات تفاضلية فقط. فالمعادلة الأولى ما هي إلا قانون جاوس بشكله التفاضلي والذي مفاده أن أي شحنة كهربائية نقطية في الفضاء لا بد أن تولد حولها مجالا كهربائيا تنطلق خطوطه من مكان الشحنة ويكون هذا المجال ساكنا لا يتغير مع الزمن إذا كانت الشحنة ساكنة ومتغيرا مع الزمن إذا كانت متغيرة. أما المعادلة الثانية فما هي إلا قانون جاوس للمغناطيسية بشكله التفاضلي والذي ينص على أنه لا وجود للشحنات المغناطيسية في الطبيعة وعليه فإن خطوط المجال لا بد وأن تكون منغلقة على نفسها. أما االمعادلة الثالثة فما هي إلا قانون فارادي للحث حيث قام ماكسويل بتحويله من شكله التكاملي إلى شكله التفاضلي أو النقطي ومفاد هذه المعادلة أن المجال المغناطيسي المتغير مع الزمن يولد حوله مجالا كهربائيا تتناسب قيمته وتوزعه في الفضاء مع معدل تغير كثافة المجال المغناطيسي مع الزمن وكذلك اتجاهه في الفضاء. أما المعادلة الرابعة فهي شكل معدل لقانون أمبير فبعد أن قام ماكسويل بتحويله من شكله التكاملي إلى شكله التفاضلي أضاف إليه حدا جديدا أطلق عليه اسم تيار الإزاحة (displacement current) وهذه الإضافة هي من أهم إسهامات ماكسويل في مجال الكهرومغناطيسية حيث مكنته من التنبؤ بوجود الأمواج الكهرومغناطيسية. وبإضافة تيار الإزاحة لمعادلة أمبير أصبح مفاد معادلة ماكسويل الرابعة أن التيار الكهربائي أو المجال الكهربائي المتغير مع الزمن يولد حوله مجالا مغناطيسيا تتناسب قيمته وتوزعه في الفضاء مع قيمة واتجاه التيار وكذلك مع معدل تغير شدة المجال الكهربائي مع الزمن واتجاهه في الفضاء.

Maxwell's Equations

$\oint\!\!\oint \vec{E}\cdot\hat{n}\,dS = \frac{q}{\varepsilon_0}$ Gauss's Law

$\oint\!\!\oint \vec{B}\cdot\hat{n}\,dS = 0$ (no monopoles)

$\oint \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0\left(i+\varepsilon_0\frac{d}{dt}\Phi_E\right)$ Ampère's Law

$\oint \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\Phi_B$ Faraday's Law

$\nabla\cdot\vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$ $\quad \nabla\times\vec{B} = \mu_0\left(\vec{J}+\varepsilon_0\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}\right)$

$\nabla\cdot\vec{B} = 0$ $\quad \nabla\times\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$

(Differential Forms)

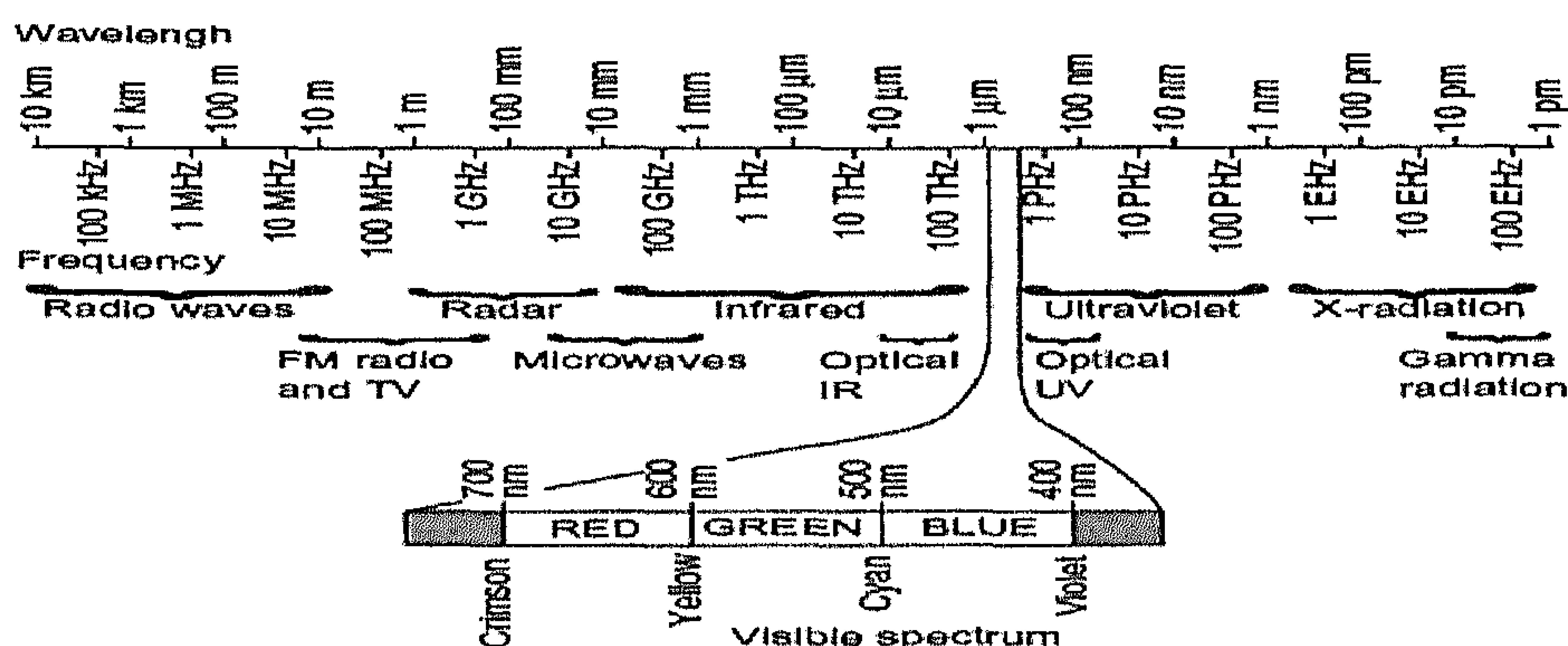
وفي عام 1865م تمكن ماكسويل من خلال دمج المعادلات الثالثة والرابعة وهما قانون فارادي وقانون أمبير المعدل الحصول على معادلة تفاضلية من الدرجة الثانية وعندما حل هذه المعادلة تبين له أن المجالات الكهربائية والمغناطيسية لا بد وأن تنتشر على شكل موجات في الفضاء. وبهذا فقد تمكن ماكسويل من خلال التحليل الرياضي البحت إثبات وجود ما يسمى بالموجات الكهرومغناطيسية (electromagnetic waves). ويمكن لمن عنده خلفية في مفاهيم الكهرومغناطيسية من خلال تمعن معادلات ماكسويل وبدون حلها أن يستنتج معظم ظواهر الكهرومغناطيسية وخاصة حقيقة وجود الموجات الكهرومغناطيسية ففي حالة وجود شحنات كهربائية ساكنةفقط (ρ) فإن المعادلة الأولى تؤكد وجود مجال كهربائي ساكن فقط ولا وجود للمجال المغناطيسي حيث أن الطرف الأيمن من المعادلة الرابعة يساوي صفر. وفي حالة وجود تيار كهربائي

ثابت فقط (J) فإن المعادلة الرابعة تؤكد وجود مجال مغناطيسي ساكن فقط ولا وجود للمجال الكهربائي حيث أن الطرف الأيمن من المعادلة الأولى يساوي صفر. وفي حالة وجود شحنات كهربائية متغيرة فقط فإن المعادلة الأولى تؤكد وجود مجال كهربائي متغير وهذا المجال الكهربائي المتغير سيولد مجالا مغناطيسيا متغيرا كما هو واضح من المعادلة الرابعة حيث أن الحد الثاني من طرفها الأيمن لا يساوي صفر. إن هذا المجال المغناطيسي المتولد من المجال الكهربائي الذي ولدته الشحنة الكهربائية ابتداءا سيولد بدوره مجالا كهربائيا جديدا حوله كما هو واضح من المعادلة الثالثة وهكذا تتوالى هذه السلسلة حيث يقوم كل من نوعي المجال بتوليد الأخر حسب المعادلتين الثالثة والرابعة وبهذا سيمتلئ كامل الفضاء بهذه المجالات الكهربائية والمغناطيسية المتفاعلة والتي أطلق عليها ماكسويل اسم الموجات الكهرومغناطيسية.

إن مثل هذه الموجات يمكن أن نحصل عليها أيضا من تيار كهربائي متغير فقط كما هو واضح من المعادلة الرابعة حيث سيولد هذا التيار مجالا مغناطيسيا متغيرا يقوم بدوره بتوليد مجال كهربائي متغيير تبعا للمعادلة الثالثة وهكذا دواليك. لقد تحققت نبوءة ماكسويل بوجود الموجات الكهرومغناطيسية على يد عالم الفيزياء الألماني هينرتش هيرتز (Heinrich Hertz) (1857-1894م) وذلك في عام 1887م حيث تمكن من توليد الموجات الكهرومغناطيسية باستخدام أشكال بسيطة من الهوائيات. ومنذ أن صاغ ماكسويل قوانين الكهرومغناطيسية في معادلاته الأربع لم يتم إضافة إلا الشيء القليل إلى علم الكهرومغناطيسية النظري. أما في المجال التطبيقي فقد تم استخدام هذه المعادلات بشكل كبير من قبل المهندسين الكهربائيين لحل كثير من المسائل كانتشار الموجات في الأوساط المختلفة كخطوط النقل ومرشدات الموجات والألياف الضوئية وفي تصميم هوائيات الإرسال والإستقبال وفي تطبيقات أخرى لا حصر لها.

3-2 الطيف الكهرومغناطيسي (Electromagnetic Spectrum)

يتكون الطيف الكهرومغناطيسي من ثلاثة أجزاء رئيسية فالجزء الأول هو الطيف الراديوي (radio spectrum) الذي يمتد من الصفر حتى 300 جيغاهيرتز وهو مستغل بأكمله في أنظمة الاتصالات الراديوية. والجزء الثاني هو طيف الأشعة المرئية وما تحت الحمراء والذي يمتد من 300 جيغاهيرتز إلى ثلاثة ملايين غيغاهيرتز وهو مستغل جزئيا في أنظمة الاتصالات الضوئية وأجهزة الرؤيا الليلية. والجزء الثالث هو طيف الأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية والكونية والتي يتعذر استخدامها لصعوبة توليدها ولخطورتها على الكائنات الحية إلا في بعض التطبيقات الطبية والصناعية كاستخدام الأشعة السينية في تصوير الأجسام الحية واختبار المواد.



ونظرا للتباين الكبير في خصائص الموجات الكهرومغناطيسية الراديوية من حيث طرق توليدها وانتشارها وأنواع الهوائيات المستخدمة فيها فقد تم تقسيمها إلى مناطق عدة. وهي الترددات مفرطة الإنخفاض (extremely low frequency ELF) (3 إلى 30 هيرتز) والترددات فائقة الإنخفاض (super low frequency SLF) (30 إلى 300 هيرتز) والترددات بالغة الإنخفاض (ultra low frequency ULF) (300 إلى 3000 هيرتز) والترددات المنخفضة جدا (very low frequency VLF) (3 إلى 30 كيلوهيرتز) والترددات المنخفضة (low frequency LF) (30 إلى 300 كيلوهيرتز) والترددات المتوسطة (medium frequency MF) (300 إلى 3000 كيلوهيرتز) والترددات العالية (high frequency HF) (3 إلى 30 ميغاهيرتز) والترددات العالية جدا (very high frequency VHF) (30 إلى 300 ميغاهيرتز) والترددات بالغة العلو(ultra high frequency UHF) (300 إلى 3000 ميغاهيرتز) والترددات فائقة العلو(super high frequency SHF) (3 إلى 30 جيغاهيرتز) والترددات مفرطة العلو(extremely high frequency EHF) (30 إلى 300 جيغاهيرتز).

وفي كثير من التطبيقات يتم استخدام طول الموجة ((λ) wavelength) بدلا من التردد (frequency (f)) ويمكن إيجاد طول الموجة من خلال تقسيم سرعة الضوء في الفراغ ($c=3x10^8 m/s$) على قيمة التردد ($\lambda=c/f$). لقد أحدث اختراع العنصر الإلكتروني المسمى بالصمام الثلاثي (triode valve) على يد المهندس الكهربائي الأمريكي لي ديفورست (Lee Deforest) في عام 1906م ثورة في أنظمة الاتصالات الكهربائية. فإلى جانب استخدام هذا العنصر في المضخمات الإلكترونية(electronic amplifiers) فقد تم استخدامه في المذبذبات الإلكترونية (electronic oscillators) التي تقوم بتوليد الترددات اللازمة لحمل إشارات المعلومات. لقد تم استخدام هذه المذبذبات في العشرينيات من القرن العشرين لتوليد الترددات المنخفضة والمتوسطة ثم العالية في الثلاثينيات ثم العالية جدا وبالغة العلو في الأربعينات. وتستخدم اليوم الترانزستورات كبديل عن هذه الصمامات لتوليد الترددات في جميع أجزاء الطيف الراديوي إلا أن الصمامات لا زالت مستخدمة لتوليد الترددات في الأنظمة ذات القدرات العالية كما في محطات البث الإذاعي والتلفزيوني وفي أنظمة الرادار.

CLASS	FREQUENCY	WAVELENGTH	ENERGY
γ	300 EHz	1 pm	1.24 MeV
HX	30 EHz	10 pm	124 keV
	3 EHz	100 pm	12.4 keV
SX	300 PHz	1 nm	1.24 keV
EUV	30 PHz	10 nm	124 eV
NUV	3 PHz	100 nm	12.4 eV
NIR	300 THz	1 µm	1.24 eV
MIR	30 THz	10 µm	124 meV
FIR	3 THz	100 µm	12.4 meV
EHF	300 GHz	1 mm	1.24 meV
SHF	30 GHz	1 cm	124 µeV
UHF	3 GHz	1 dm	12.4 µeV
VHF	300 MHz	1 m	1.24 µeV
HF	30 MHz	10 dam	124 neV
MF	3 MHz	100 hm	12.4 neV
LF	300 kHz	1 km	1.24 neV
VLF	30 kHz	10 km	124 peV
VF/ULF	3 kHz	100 km	12.4 peV
SLF	300 Hz	1 km	1.24 peV
ELF	30 Hz	10 Mm	124 feV
	3 Hz	100 Mm	12.4 feV

وتواجه مصممي أنظمة الاتصالات الراديوية أو اللاسلكية مشكلة توفير الترددات اللازمة لأعداد كبيرة ومتزايدة من أنظمة الاتصالات المختلفة كأنظمة البث الإذاعي والتلفزيوني والهواتف اللاسلكية والخلوية وأنظمة الأقمار الصناعية وأنظمة الرادار وأنظمة الاتصالات العسكرية والمدنية وأنظمة الملاحة الجوية والبحرية والبرية. ويعود السبب في هذه المشكلة للعدد المحدود من الترددات المتاحة في الطيف الكهرومغناطيسي ولكون جو الأرض وسطا مشتركا تنتشر فيه جميع الترددات التي تبثها الأنظمة اللاسلكية مما يمنع إعادة استخدام نفس التردد في نفس المنطقة تجنبا لتداخل إشارات الأنظمة المختلفة. وقد

استخدمت أنظمة الاتصالات معظم مناطق الطيف الراديوي باستثناء الترددات بالغة العلـو التـي حـال دون استخدامها تأثرها الكبير بالأحوال الجوية بسبب قصر طول موجتها ولكن مع تزايد الطلـب علـى اسـتخدام الأقمار الصناعية وشح الترددات المتاحة فقد بدأ باستخدام هذه الترددات في بعض التطبيقات.

يتم تخصيص الترددات للمستخدمين من قبل هيئات تنظيم قطاع الاتصالات الوطنية بالتعـاون مـع الاتحاد الدولي للاتصالات (International Telecommunication Union ITU) والذي يحدد التـرددات المتاحة لأنظمة الاتصالات المختلفة. وعادة ما يتم السماح بإعادة استخدام نفس التردد (frequency reuse) من قبل أكثر من مستخدم شريطة ضمان عدم وجود تداخل بين الأنظمة المختلفة التي تعمل على نفس التـردد وذلك بالاستفادة من التباعد الجغرافي وتحديد قدرة البث المرسلات واستخدام طرق تعديل وتشفير واسـتقطاب مختلفة. ولقد تم تخصيص أجزاء من الطيف الراديوي لبعض التطبيقات المهمة بشكل دائم كتخصيص جـزء من الترددات المتوسطة (540 إلى 1700 كيلوهيرتز) للبث الإذاعي متوسط الموجة (MW radio) بواقع تسعة كيلوهيرتز لكل محطة وجزء من الترددات العالية للبث الإذاعي قصير الموجة (SW radio) وجـزء من الترددات العالية جدا (من 88 إلى 108 ميغاهيرتز) للبث الإذاعي بتعديل التـردد (FM radio) بواقـع مائتي كيلوهيرتز لكل محطة وأجزاء من الترددات العاليـة جـدا (مـن 54 إلـى 88 ومـن 174 إلـى 216ميغاهيرتز) وجزء كبير من الترددات فوق العالية (470 إلى 790 ميغاهيرتز) للبث التلفزيوني بواقـع ستة ميغاهيرتز لكل محطة. أما أنظمة الاتصالات الخلوية فقد تم تخصيص عدة نطاقات لتردداتها وهي (890 إلى 960 ميغاهيرتز) و (1710 إلى 1990 ميغاهيرتز) أما أنظمة اتصالات الأقمار الصناعية والأمـواج الدقيقة والرادارات فتستخدم الترددات التي تمتد من واحد إلى مائة جيقاهيرتز.

2-4 انتشار الموجات الكهرومغناطيسية

تتكون الموجة الكهرومغناطيسـية مـن مجـال كهربـائي (electric field) وآخـر مغناطيسـي (magnetic field) متعامدان على بعضهما البعض في الفضاء ويتغيران بشكل دوري مع الـزمن وبحيـث تنتشر الموجة باتجاه يتعامد مع اتجاهي المجالين الكهربائي والمغناطيسي حسب قاعدة معينة. وتنتشر الموجات الكهرومغناطيسية في الأوساط المختلفة بسرعة ثابتـة تتحدد من قيم السـماحية الكهربائيـة (permittivity) والنفاذية المغناطيسية (permeability) للوسط الـذي تنتشر فيه الموجة حيـث تسـاوي سـرعة الانتشـار (propagation speed) معكوس الجـذر التربيعـي لحاصل ضرب السماحية في النفاذية ($v = 1/\sqrt{\mu\varepsilon}$). وتبلغ سرعة الانتشار في الفضاء الحر ثلاثمائـة ألـف كيلومتر في الثانية تقريبا وهي نفس سرعة الضوء في الفراغ والذي مـا هـو إلا أحـد أشـكال الموجـات الكهرومغناطيسية كما اكتشف ذلك ماكسويل. إن سرعة أنتشار الموجات في أي وسط لا يمكن أن تزيد عـن سرعتها في الفراغ لأن قيم السماحية والنفاذية لهذه الأوساط أعلى من قيمهما في الفـراغ. وعنـدما تنتشـر موجة كهرومغناطيسية في وسط ما فإن المسافة بين قمتين من قممها مقاسة بالأمتار يسـمى طـول الموجـة

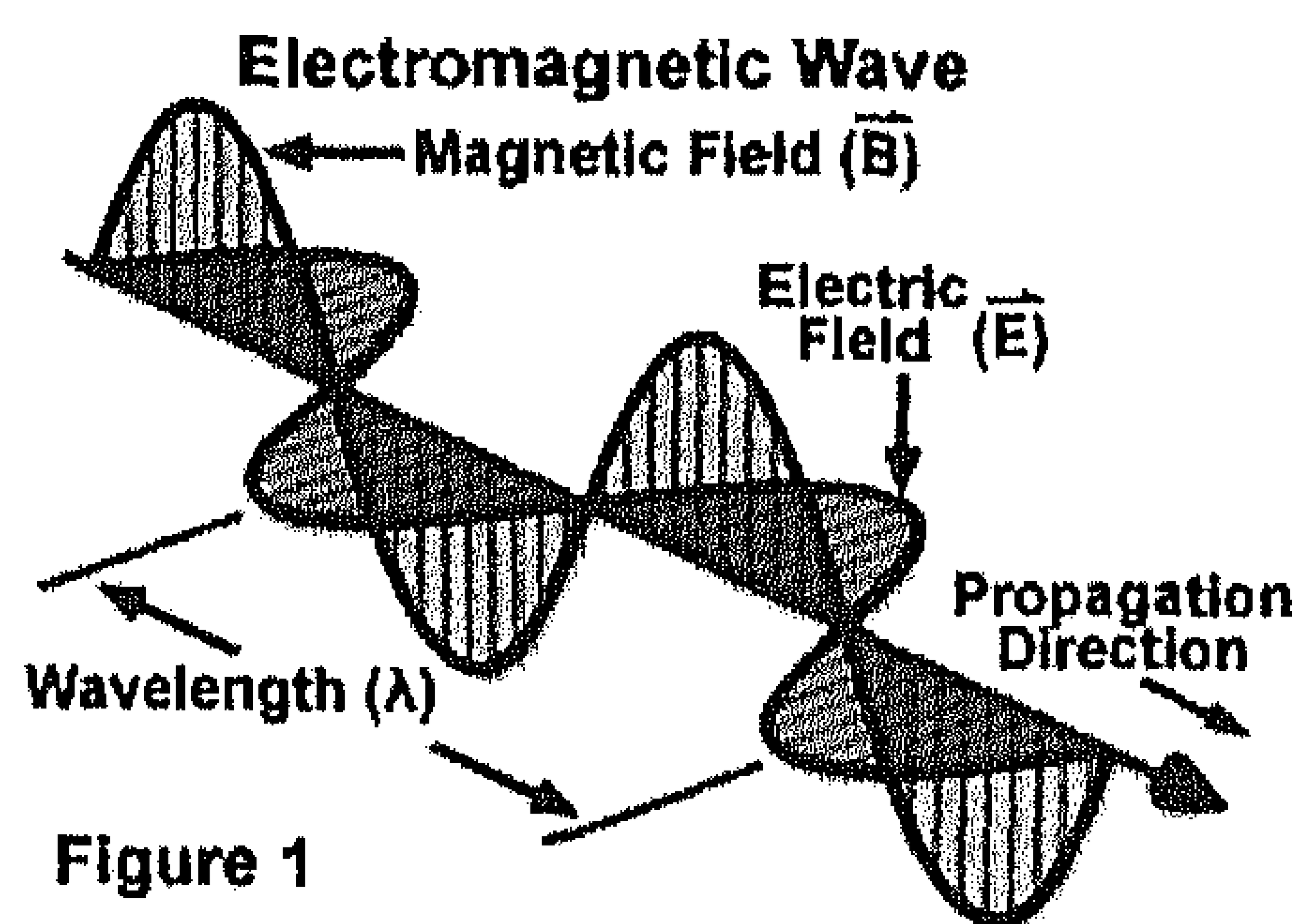
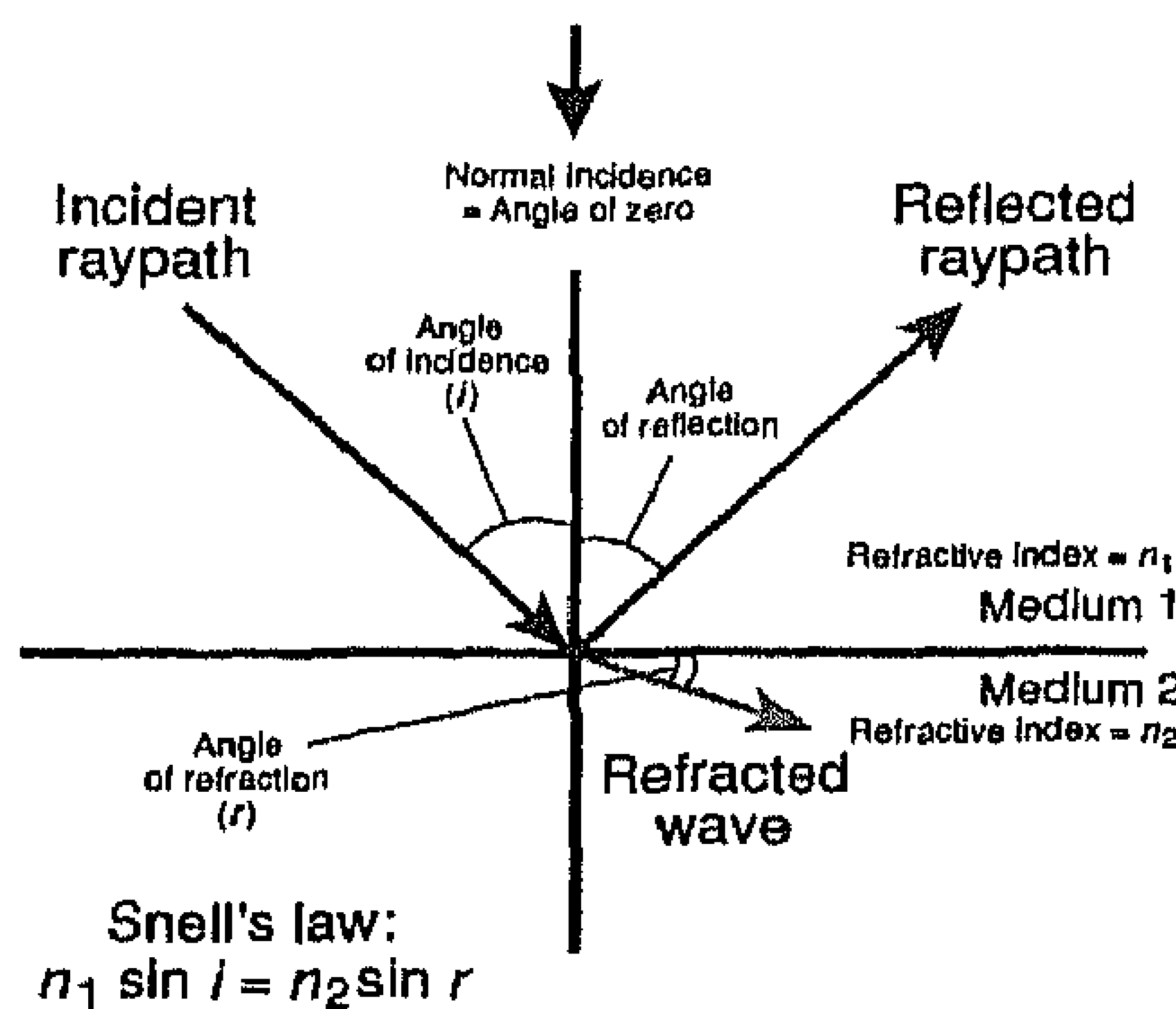


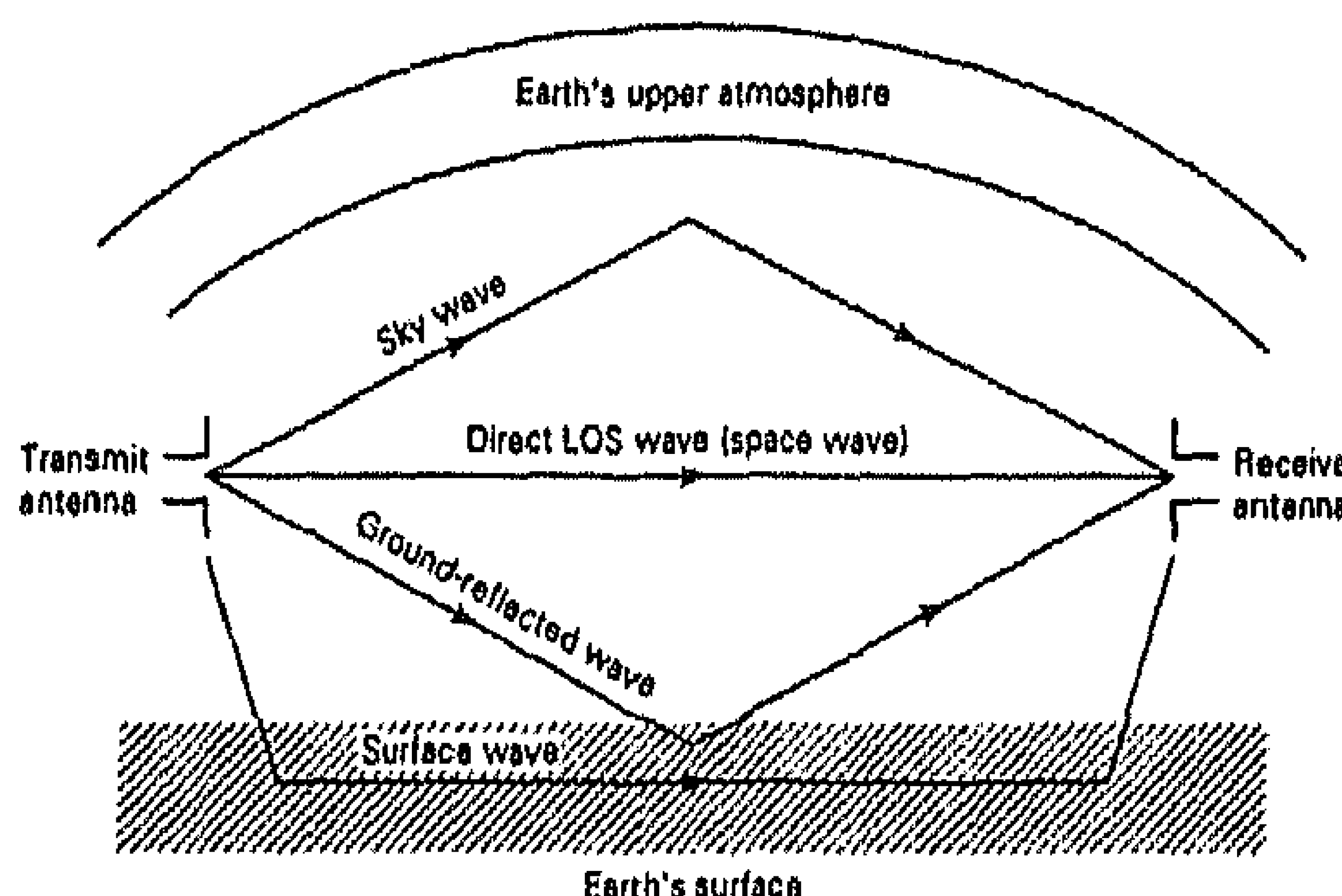
Figure 1

(wavelength) والتي تساوي حاصل تقسيم سرعة انتشار الموجة على ترددها ($\lambda = v/f$). إن نسبة شدة المجال الكهربائي إلى شدة المجال المغناطيسي في الموجة الكهرومغناطيسية يسمى المعاوقة المتأصلة (intrinsic impedance) وتساوي الجذر التربيعي لحاصل قسمة النفاذية على السماحية للوسط الذي تنتشر فيه هذه الموجة ($\eta = \sqrt{\mu / \varepsilon}$) وتبلغ قيمتها في الفراغ 377 أوم. ويعرف إستقطاب الموجة (wave polarization) بأنه الاتجاه الذي يشير إليه مجالها الكهربائي في الفضاء وعند اتخاذ سطح الأرض كمرجع فإن الموجة تكون عامودية الإستقطاب (vertical polarization) إذا كان اتجاه مجالها الكهربائي عاموديا على سطح الأرض وأفقية الإستقطاب (horizontal polarization) إذا كان اتجاه مجالها الكهربائي موازيا لسطح الأرض. وفي بعض أنواع الموجات يتغير اتجاه المجال الكهربائي في الفضاء بشكل مستمر بحيث يتحرك متجه المجال (vector) بشكل دائري أو اهليجي ولذلك يسمى استقطابها الاستقطاب الدائري أو الاهليجي (circular or ellipitical polarization).

وتنتشر الموجات الكهرومغناطيسية في الفراغ أو في أي وسط متجانس على شكل خطوط مستقيمة ولكنها قد تتعرض لظواهر عدة عند انتقالها من وسط إلى وسط وهي ظواهر الإنعكاس (reflection) والإنكسار (refraction) والحيود (diffraction) والتشتت (scattering). فعند إنتقال موجة كهرومغناطيسية من وسط إلى وسط بينهما حد منتظم غير متعرج فإن جزءا من هذه الموجة سينعكس راجعا في الوسط الذي جاء منه وبحيث تساوي زاوية الإنعكاس زاوية السقوط بينما ينفذ الجزء المتبقي من الموجة الساقطة إلى الوسط الثاني ويسير فيه بشكل منكسر حيث تتحدد زاوية الإنكسار من زاوية السقوط وكذلك معاملات الإنكسار (refractive index) لكلا الوسطين حسب قانون سنل (Snell's Law). وإذا ما سقطت موجة على وسط ذي سطح متعرج فإن الإنعكاس لن يكون في اتجاه واحد بل في اتجاهات متعددة وتسمى هذه الظاهرة بظاهرة التشتت. وعندما تسقط موجة على جسم له أبعاد تقل عن طول الموجة فإن هذه الموجة لن تتأثر كثيرا بوجود هذا الجسم بل ستحيد عنه وتكمل مسارها وتسمى هذه الظاهرة بظاهرة الحيود.



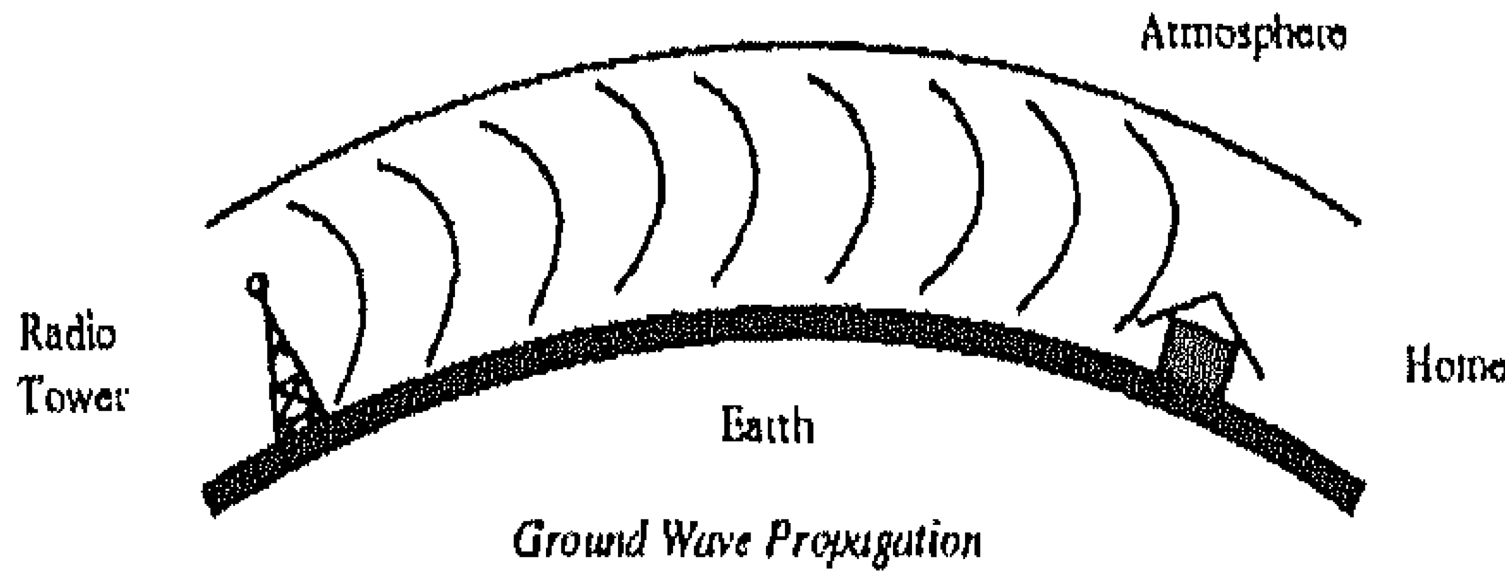
وجدير بالذكر أن جميع المعادن لا تسمح بالموجات الكهرومغناطيسية بالنفاذ من خلالها بل تعكسها كليا إلى الوسط الذي جاءت منه وعليه فإنه لا يمكن إستقبال أو إرسال هذه الموجات من داخل مباني جدرانها وأسقفها من المعادن. وبما أن معظم أنظمة الاتصالات الكهربائية تعمل على سطح الأرض الكروية الشكل وكذلك ضمن الغلاف الجوي المحيط بها والذي تتغير خصائصه بشكل مستمر مع تغير الليل والنهار وتغير الفصول فإنها تتعرض في



الغالب إلى عدد من الظواهر بعضها ذا فائدة كبيرة لبعض أنظمة الاتصالات وبعضها الآخر يقلل من حسن أدائها. ومن هذه الظواهر انعكاس الأمواج عند ارتطامها بالأرض وبعض طبقات الغلاف الجوي مما يؤدي إلى تغيير اتجاه انتشارها ومنها انكسار الأمواج عند انتقالها من طبقة إلى طبقة أخرى في الغلاف الجوي وهناك ظاهرة الحيود (diffraction) حيث تقوم بعض الأمواج بتخطي بعض العوائق الطبيعية وتكمل مسارها وهناك الفقد (attenuation) الناتج عن امتصاص مكونات الغلاف الجوي لبعض طاقة الأمواج وهناك التبعثر (scattering) الناتج عن ارتداد جزء من الموجة عند ارتطامها بمنطقة غير متجانسة في الغلاف الجوي. ويمكن تقسيم الموجات من حيث طريقة انتشارها فوق سطح الأرض وضمن الغلاف الجوي إلى ثلاثة أنواع وهي الموجات السطحية والسماوية والفضائية.

الموجات السطحية أو الأرضية (Surface or Ground Waves)

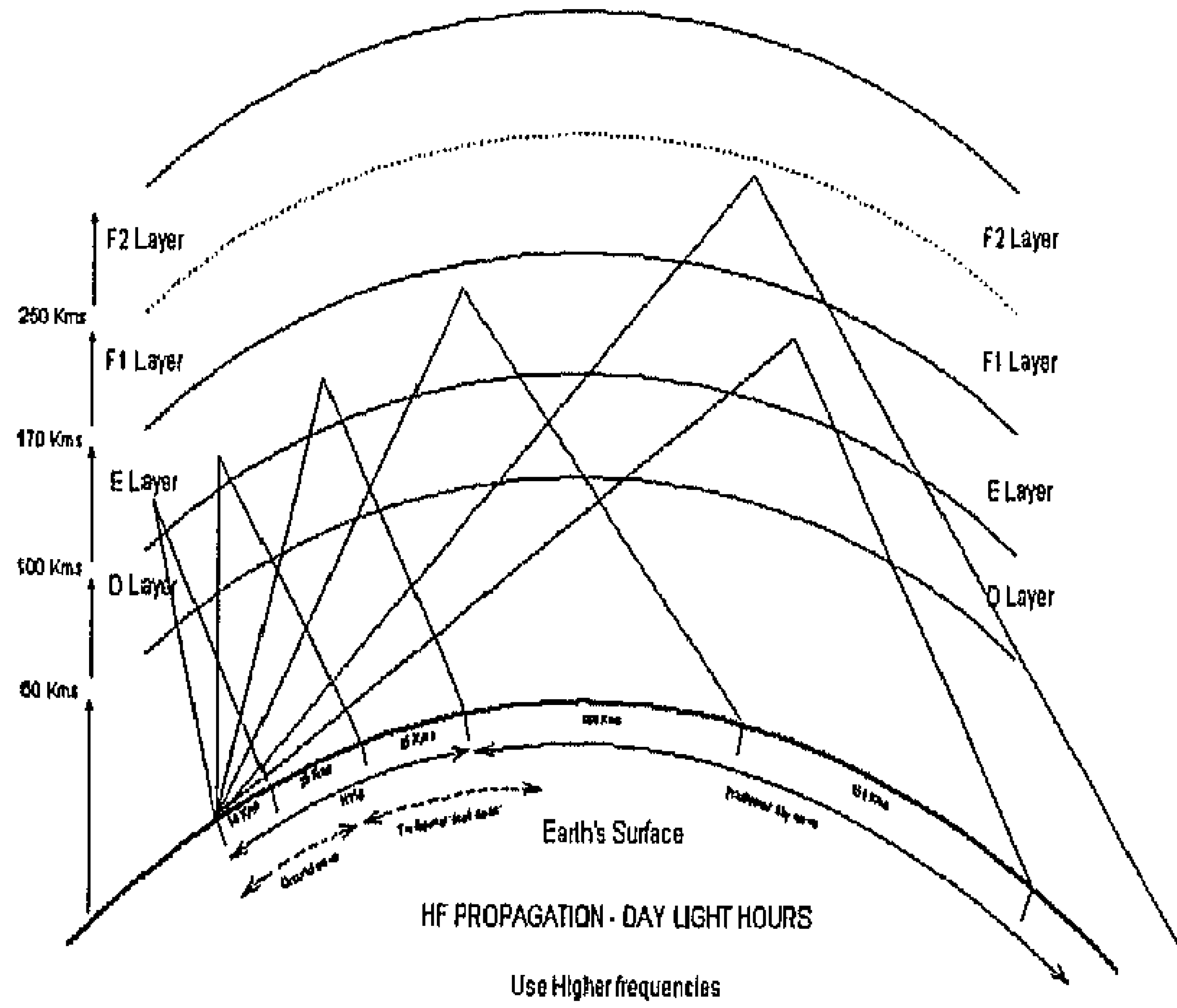
تعرف الموجات السطحية أو الأرضية بأنها تلك التي تسير ملاصقة لسطح الأرض وينحني مسار انتشارها مع انحناء سطح الأرض ويعود السبب في ذلك إلى ظاهرة حيود الموجات الكهرومغناطيسية (diffraction) حول سطح الأرض الكروي الشكل. وقد وجد العلماء أنه كلما قل تردد الموجة الراديوية كلما ازداد حيودها وتسير بذلك مسافات طويلة ملاصقة لسطح الأرض. وعلى العكس من ذلك فكلما ازداد ترددها كلما قل حيودها حيث تختفي ظاهرة الحيود حول الأرض تدريجيا عند بداية نطاق الترددات العالية (ما يزيد عن 3 ميغاهيرتز) أي أن ظاهرة الحيود تظهر بشكل واضح في الترددات المتوسطة والمنخفضة وما دونها. ولقد تم الاستفادة من هذه الظاهرة لبناء أنظمة اتصالات بعيدة المدى كأنظمة البث الإذاعي التي تعمل في نطاق الترددات المتوسطة والتي قد تصل تغطيتها لعدة آلاف من الكيلومترات وكذلك في أنظمة الاتصالات البحرية التي تعمل في نطاق الترددات المنخفضة وتصل تغطيتها لعشرات آلاف من الكيلومترات. إلا أن عيبها يكمن في حاجتها لقدرات بث عالية نظرا للفقد الذي تتعرض له الموجة من قبل امتصاص بعض طاقتها من قبل سطح الأرض وعادة ما يستخدم الاستقطاب العامودي في هذه الموجات للتقليل من أثر الفقد وذلك لكون إتجاه المجال الكهربائي عموديا على سطح الأرض.



Ground Wave Propagation

الموجات السماوية (Sky Waves)

يستفيد هذا النوع من الموجات من وجود مناطق عالية التأين في طبقات الجو العليا يطلق عليها اسم طبقات الأيونسفير (Ionosphere layers) والتي تمتد في الجو من خمسين كيلومتر إلى ما يزيد عن أربعمائة كيلومتر فوق سطح الأرض. ويعود السبب في ظهور هذه الطبقات لتأين ذرات الهواء المختلفة من الإشعاعات القادمة من الشمس وخاصة الأشعة فوق البنفسجية ولذلك فإن هذه الطبقات تكون عالية التأين عند منتصف النهار وقليلة التأين أثناء الليل حيث تختفي الطبقات القريبة من الأرض تماما. وتعمل هذه الطبقات على ارتداد بعض أنواع الأمواج الراديوية الموجهة إليها من محطات البث الأرضية ثانية إلى الأرض حيث

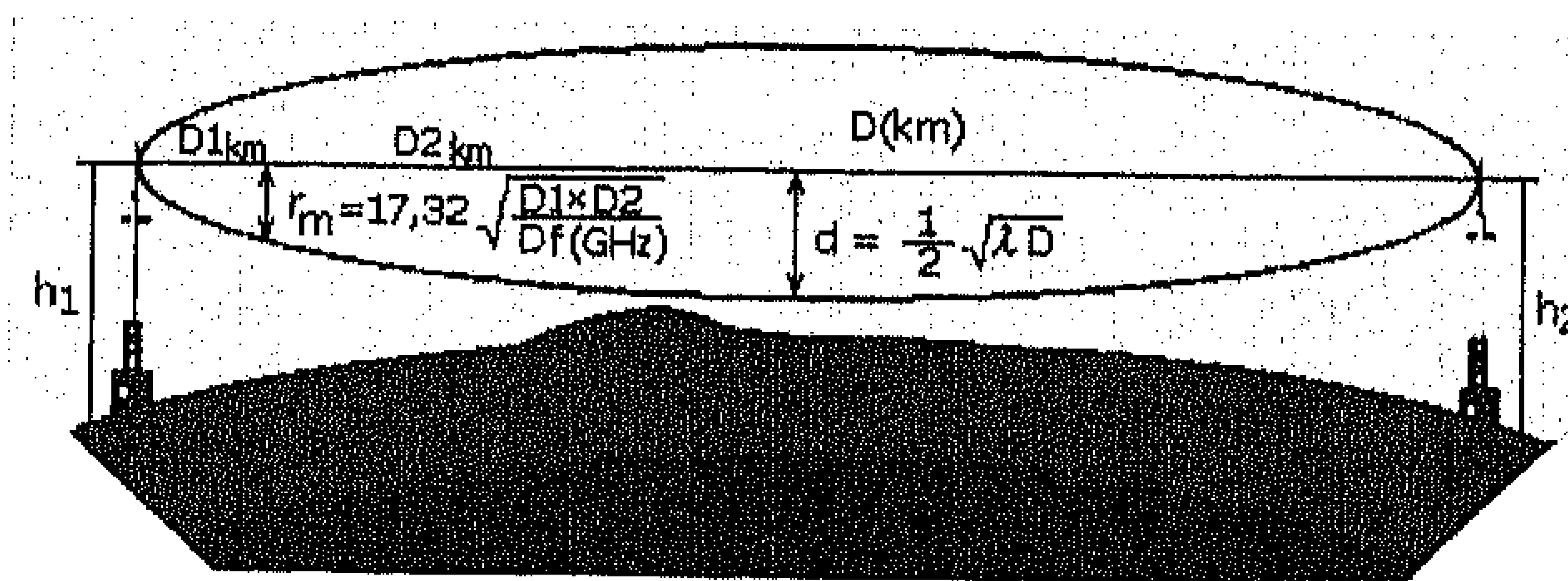


تتحدد قوة الموجة المنعكسة على زاوية السقوط وارتفاع الطبقة التي عملت على ردها وكذلك درجة تأينها. وقد تم تقسيم الأيونسفير إلى أربعة طبقات رئيسية تبعا لدرجة تأين الهواء فيها وارتفاعها عن سطح الأرض وأوقات ظهورها خلال ساعات اليوم. فأقرب الطبقات إلى الأرض هي طبقة دي (D-layer) وتمتد من 50 إلى 100 كيلومتر وهي أقل الطبقات تأينا ولا تظهر إلا في النهار وبسبب تدني تأينها فهي غير قادرة على عكس الموجات ولكنها تمتص جزء من طاقة الموجات التي تخترقها مما يقلل من كفاءة أنظمة الاتصالات.

أما طبقة إي (E-layer) فتمتد من 100 إلى 170 كيلومتر وهي تظهر في النهار وتختفي بعد غياب الشمس بقليل وهي قادرة على عكس الموجات وتستخدم في أنظمة الاتصالات لمسافات قد تصل إلى 500 كيلومتر. أما طبقة إف-1 (F1-layer) فتمتد من 170 إلى 250 كيلومتر وهي تظهر في النهار ولكنها لا تختفي بكاملها في الليل بل تندمج مع طبقة إف-2 (F2-layer) التي تمتد من 250 إلى 400 كيلومتر وهي أشد الطبقات تأينا وهي لا تختفي أبدا. وتستخدم طبقة إف (F-layer) الناتجة عن اندماج طبقتيها في الليل في أنظمة الاتصالات بعيدة المدي تصل لعدة آلاف من الكيلومترات. ولحسن الحظ أن طبقة الأيونسفير لا تعكس إلا الترددات الواقعة في نطاق الترددات العالية وما دونها (أقل من 30 ميغاهيرتز) وإلا لما كان بإمكاننا استخدام الأقمار الصناعية في أنظمة الاتصالات الحديثة. ولقد تم الاستفادة من طبقة الأيونسفير في بناء أنظمة اتصالات بعيدة المدى حيث يتم توجيه هوائيات الإرسال باتجاه طبقة الأيونسفير بزاوية محددة فتنعكس الأمواج عنها باتجاه منطقة أخرى على سطح الكرة الأرضية وتصل تغطية مثل هذه الأنظمة لعدة آلاف من الكيلومترات. وتعمل أنظمة البث الإذاعي ذات الترددات العالية (الموجات القصيرة) بناء على هذا المبدأ ولكن عيبها أنها لا تعمل إلا في أوقات زمنية محددة وذلك بسبب تغير خصائص طبقة الأيونسفير مع تغير موقع الشمس التي هي المسبب الرئيس في عملية تأين هذه الطبقات.

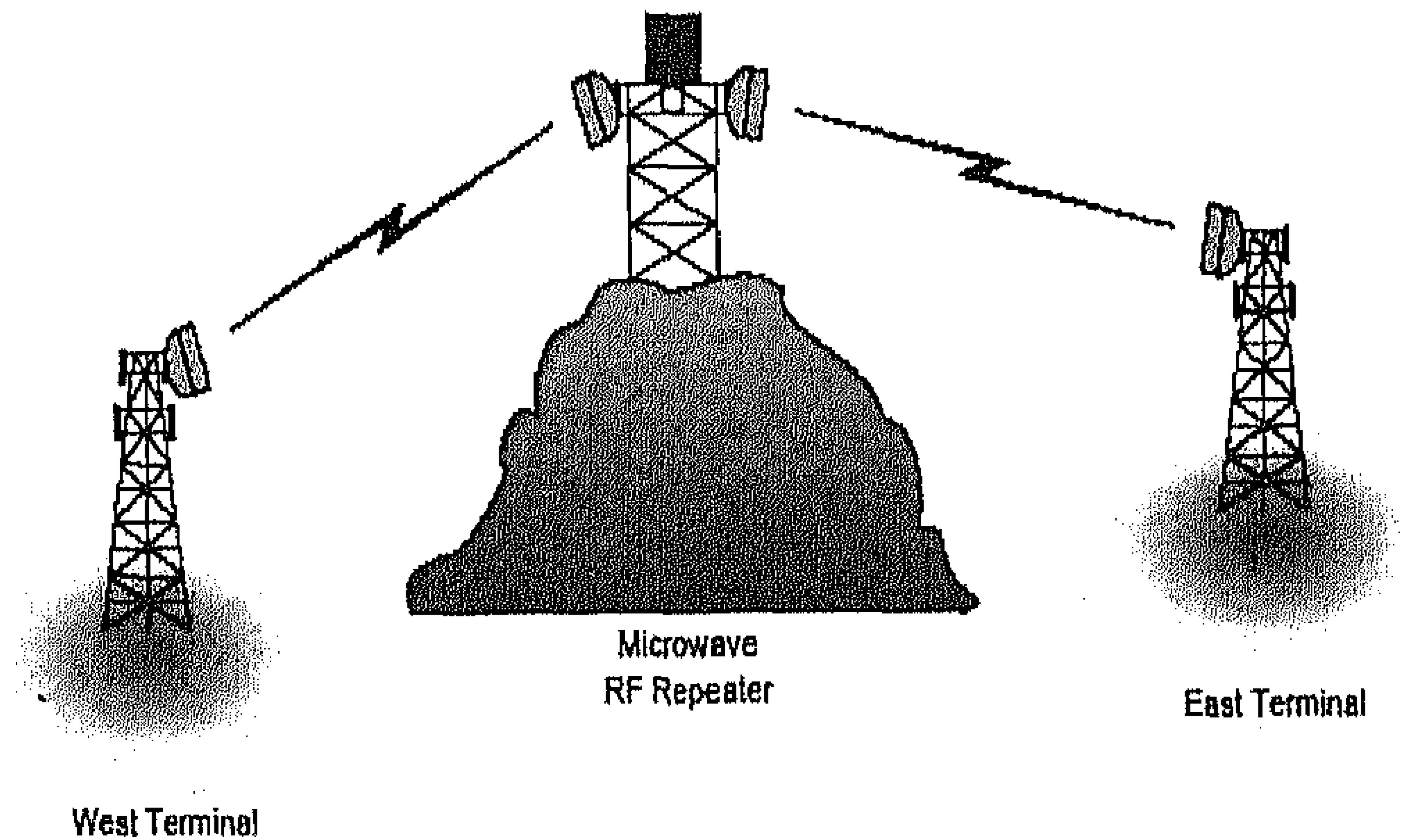
الموجات الفضائية (Space Waves)

الموجات الفضائية هي تلك الموجات التي تسير في خطوط مستقيمة فلا تستطيع الأرض أن تحيدها عن مسارها المستقيم ولا تتمكن طبقة الأيونسفير كذلك من اعتراض طريقها بل تنفذ من خلاله دون فقد يذكر. وتشمل هذه الموجات جميع الترددات التي تزيد عن 30



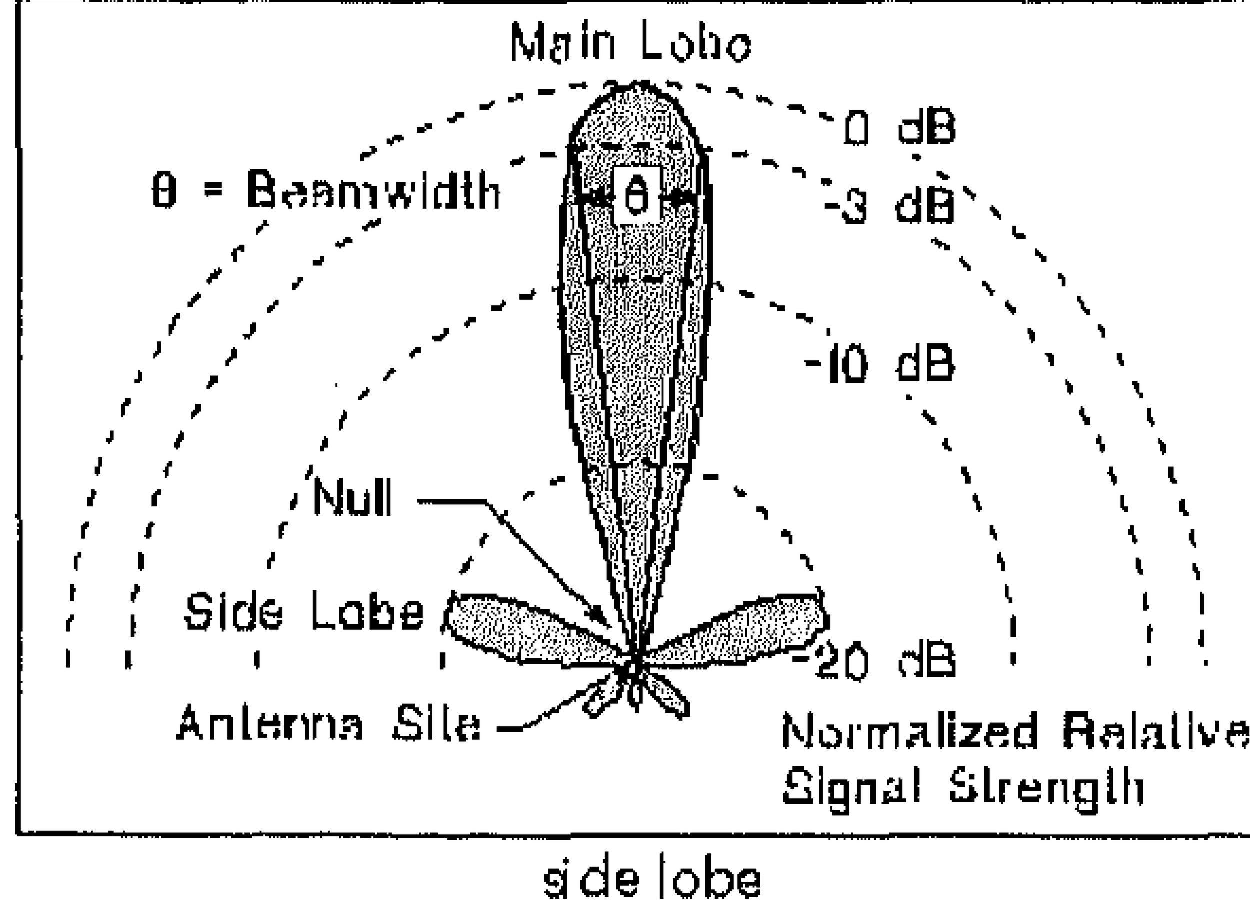
ميغاهيرتز أي نطاق الترددات العالية جدا وما فوقها. ونظرا لأن هذه الموجات تسير في خطوط مستقيمة فلا بد من توفر ما يسمى بخط النظر بين هوائي الإرسال وهوائي الاستقبال (line of sight) لإتمام عملية الاتصال بينهما. ونعني بخط النظر بين الهوائيين أنه لو تم مد خط مستقيم بينهما فيجب أن لا ينقطع هذا الخط بأي عائق مادي يحول دون وصول الأمواج من هوائي الإرسال إلى هوائي الاستقبال. وعادة ما يتم رفع الخط الواصل بين الهوائيين عن أعلى قمة في مسار الموجة بمسافة كافية تعتمد قيمتها على بعد هذه القمة عن المرسل وعن المستقبل وعلى التردد ويسمى هذا الخلوص بخلوص منطقة فريسنل (Fresnel zone clearance). وبسبب أن الأرض كروية الشكل فيجب أن لا تزيد المسافة بين الهوائيين عن مسافة محددة وإلا انقطع خط النظر بينهما نتيجة لتبعج الأرض بينهما (earth bulge). وتتحدد مسافة الإرسال القصوى بين الهوائيين من ارتفاع كل منهما عن سطح البحر والذي يساوي ارتفاع موقع الهوائي عن سطح البحر مضافا إليه طول الهوائي وكذلك من ارتفاعات الجبال الواقعة بينهما. ولقد وجد عمليا أن المسافة القصوى بين الهوائيات لا تتجاوز في الغالب مائة كيلومتر وذلك نتيجة للصعوبات الفنية والاقتصادية في بناء أبراج عالية للهوائيات.

إن هذه التحديد في المسافة القصوى بين الهوائيات ليس عائقا دون بناء أنظمة اتصالات بعيدة المدى بين المدن وبين الدول طالما أنه لا يوجد عوائق طبيعية كالبحار والمحيطات تفصل بينها وذلك باستخدام ما يسمى بالأنظمة متعددة القفزات (multihop). ويتكون نظام الاتصالات متعدد القفزات من مرسل رئيس موجود عند مصدر المعلومات ومستقبل رئيس موجود عند مورد المعلومات ومن عدة محطات تقوية تسمى المعيدات (repeaters or relay stations) حيث يستقبل المعيد الإشارة الضعيفة من هوائي الاستقبال ويقوم بتكبيرها ثم يبثها بهوائي الإرسال باتجاه المعيد الذي يليه وهكذا حتى تصل الإشارة للمستقبل الرئيس. أما بخصوص الدول التي يفصل بينها عوائق طبيعية كالمحيطات مثلا فلم يكن بالإمكان استخدام الأمواج الفضائية في أنظمة الاتصالات إلى أن تم استخدام الأقمار الصناعية كمعيدات معلقة في السماء في عام 1957م. وتستخدم هذه الموجات الفضائية في أنظمة البث التلفزيونية وفي البث الراديوي بتعديل التردد وفي أنظمة الهواتف الخلوية وفي معظم وصلات أنظمة الاتصالات كما في أنظمة اتصالات الأمواج الدقيقة وأنظمة الأقمار الصناعية والرادارات وأنظمة الاتصالات الفضائية.



5-2 الهوائيات (Antennas)

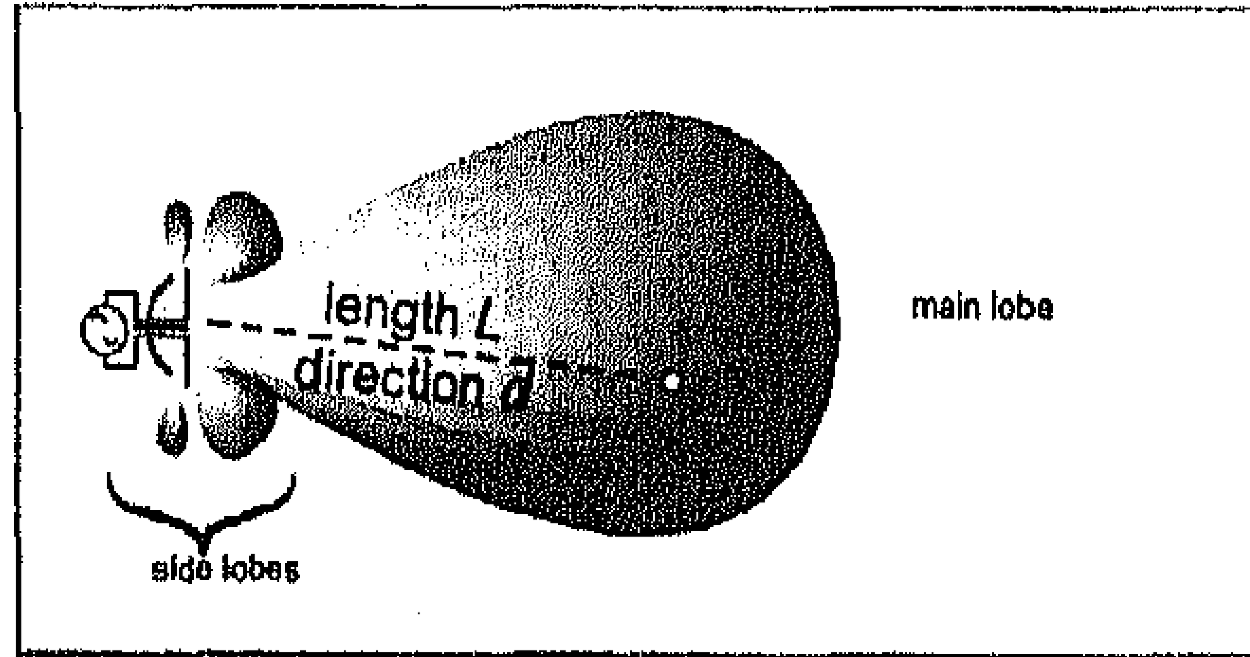
يتم توليد الموجات الكهرومغناطيسية باستخدام ما يسمى بهوائيات الإرسال (transmit antenna) التي تقوم بتحويل الإشارات الكهربائية التي تغذى إليها من المرسل (transmitter) إلى موجات كهرومغناطيسية تنتشر في الفضاء. ويتم التقاط هذه الموجات المنتشرة في الفضاء بما يسمى هوائيات الاستقبال (receive antenna) التي تقوم بتحويلها إلى إشارات كهربائية مرة ثانية لتسلمها إلى المستقبل (reciever). وتمتاز الهوائيات ببساطة تركيبها حيث يمكن لأي سلك أو سطح معدني إشعاع والتقاط الموجات الكهرومغناطيسية ولكن الهوائيات العملية لها أشكال وأبعاد معينة تحدد حسب الغرض الذي صنعت من أجله. إن من أهم مواصفات الهوائيات هو ما يسمى بنسق الإشعاع (radiation pattern) والذي يحدد طريقة توزيع الطاقة الذي يبثها أو يلتقطها



side lobe

الهوائي في الاتجاهات المختلفة فالهوائي المثالي (isotropic antenna) يبث طاقته بالتساوي في جميع الاتجاهات أما الهوائيات العملية فقد يكون بثها في اتجاهات معينه أعلى منها في اتجاهات أخرى. ففي بعض التطبيقات كأنظمة الأقمار الصناعية وأنظمة الأمواج الدقيقة يتطلب تركيز البث في إتجاه واحد فقط حيث يوجد المستقبل وذلك على شكل شعاع ضيق وذلك لتوفير كمية الطاقة المبثوثة. وفي تطبيقات أخرى كأنظمة البث الراديوي والتلفزيوني يتطلب أن يكون البث في جميع الاتجاهات الموازية لسطح الأرض وذلك لتغطية جميع المستقبلات التي تتوزع حول محطة الإرسال.

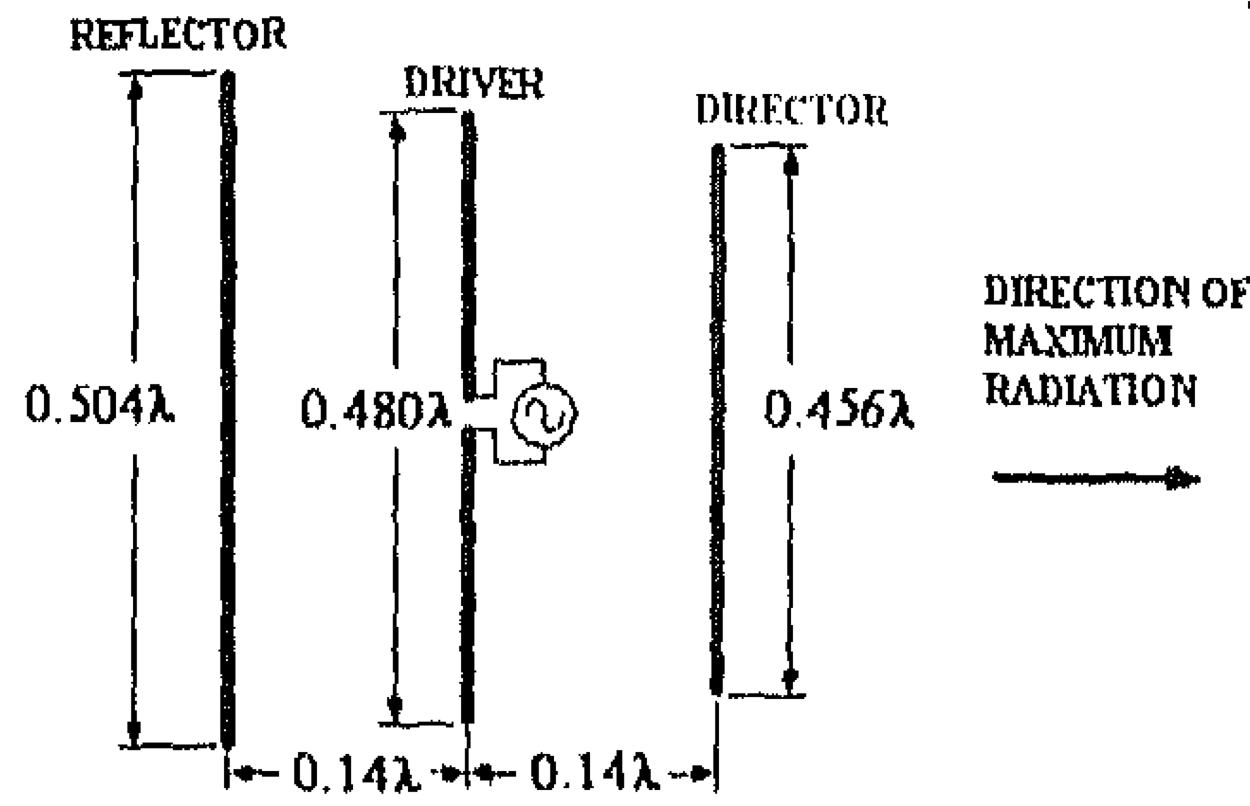
ومن مواصفات الهوائيات ما يسمى بكسب الهوائي (antenna gain) والذي يحدد قدرة الهوائي على تركيز طاقة البث في إتجاه الفص الأعظم (main lobe) من نسق الإشعاع وكلما زاد كسب الهوائي كلما قل ما يسمى بعرض الشعاع (beamwidth) . ومن المواصفات الأخرى للهوائي مدى طيف الترددات التي يمكن للهوائي إشعاعها أو التقاطها أو ما يسمى عرض نطاق الهوائي (antenna bandwidth) والذي عادة ما يتركز حول تردد معين يتحدد من أبعاد الهوائي. ومن المواصفات أيضا مقدار معاوقة أو مقاومة المدخل للهوائي (input resistance or impedance) والذي يستخدم لأغراض موائمة الهوائيات عند ربطها بخطوط النقل (transmission line) التي تغذيها بالإشارات الكهربائية. ولكي تتمكن الهوائيات من الاستقبال من بعضها البعض فيجب أن يكون لها نفس الاستقطاب ويعرف إستقطاب الهوائي (antenna polarization) بأنه إتجاه المجال الكهربائي للموجة التي يبثها الهوائي في الفضاء. ولا بد من التأكيد على أن أي هوائي يمكن أن يستخدم إما للإرسال أو الاستقبال وأن جميع مواصفاته تبقى كما هي في الحالتين. ويوجد أنواع كثيرة من



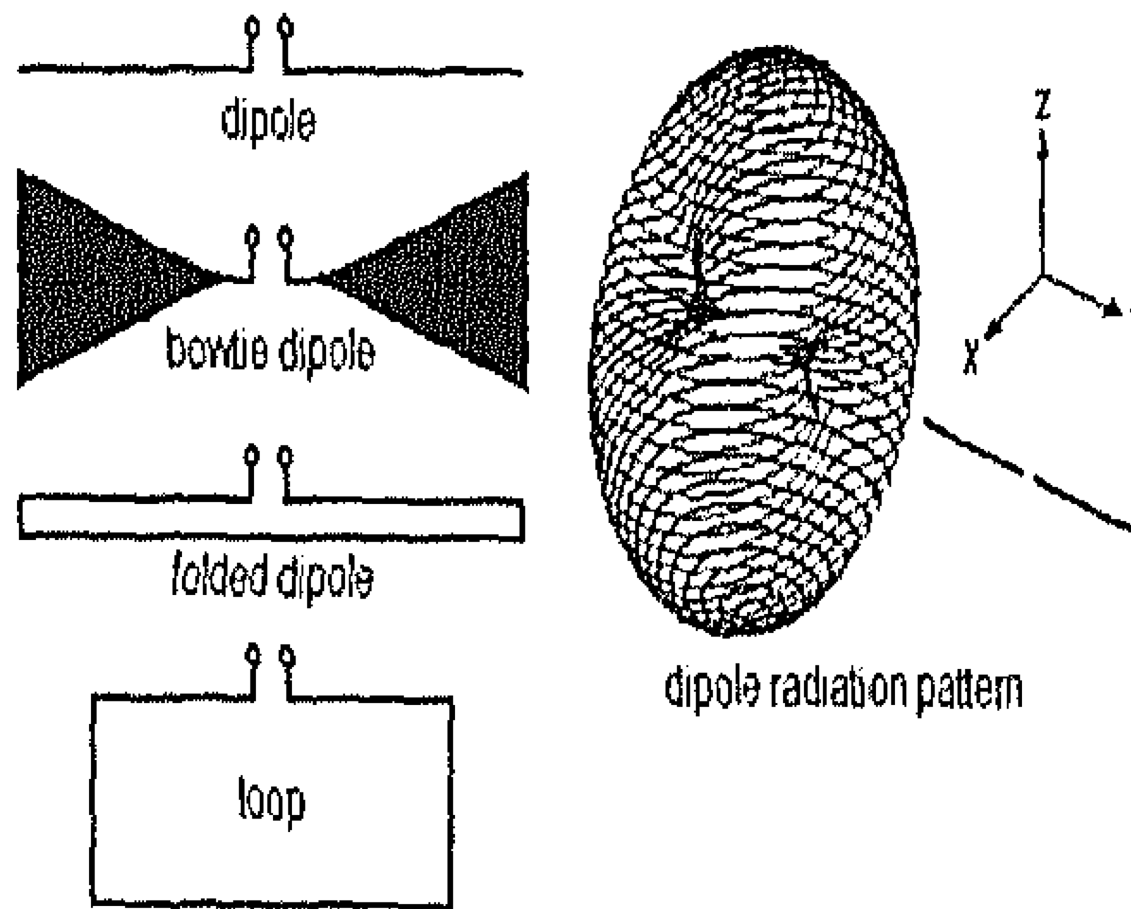
الهوائيات تتفاوت أبعادها وأشكالها بشكل كبير جدا حسب نوع نظام الاتصـــالات فمــن الهوائيــات الســلكية المستخدمة في الراديو والتلفزيون والهواتف الخلوية والتي تتراوح أطوالها بين عدة سنتيمترات وعــدة أمتــار إلى الهوائيات البوقية والصحنية المستخدمة في أنظمة الموجات الدقيقة وأنظمة الأقمار الصناعية والــرادارات والتلسكوبات الراديوية والتي تتراوح أقطارها بين عشرات السنتيمرات وعشرات الأمتار.

الهوائيات السلكية (Wire Antennas)

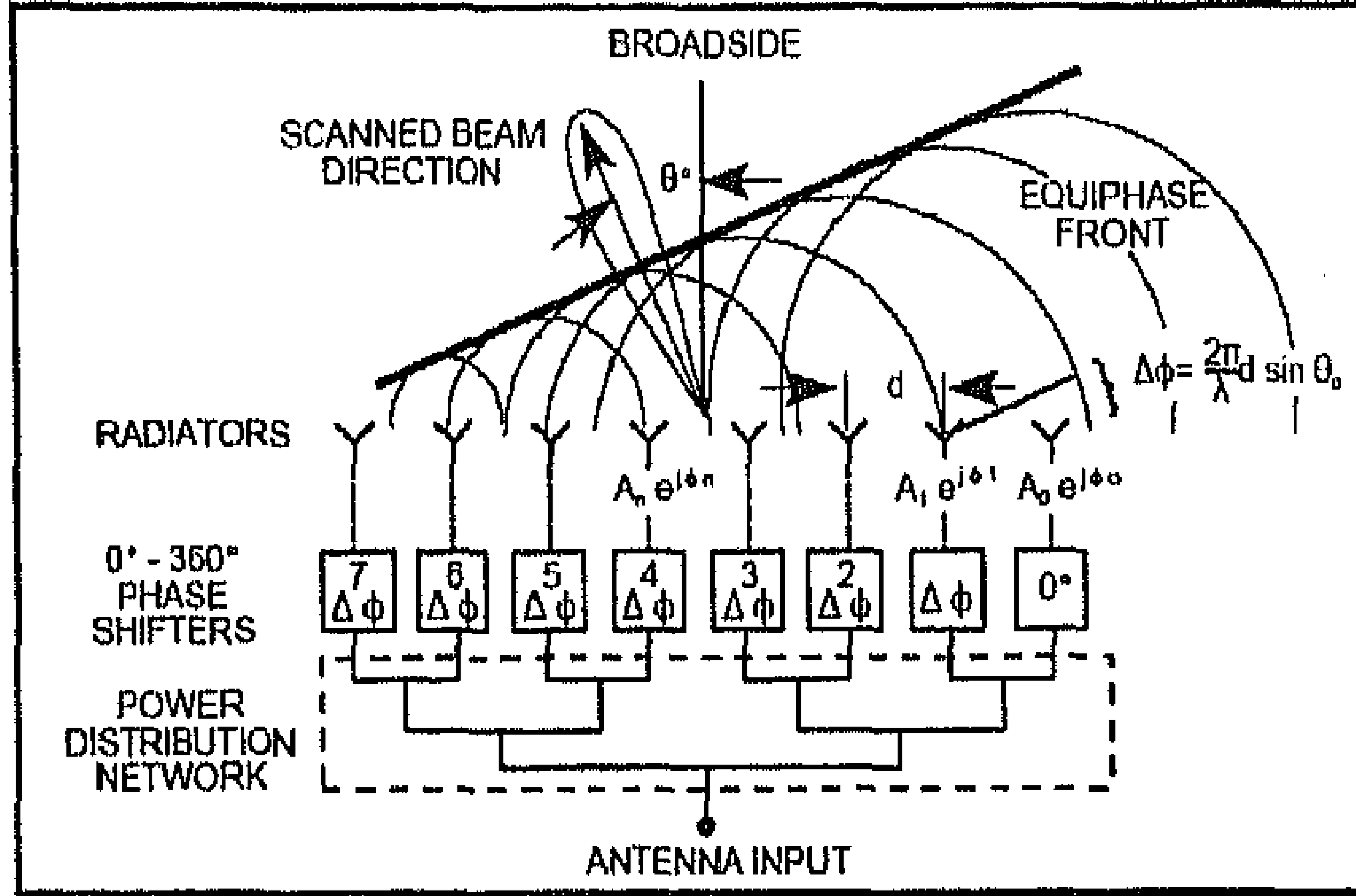
تتميز الهوائيات السلكية ببساطة تركيبها حيث يمكن لأي سلك معدني أن يعمل كهوائي إرســال أو إستقبال ولكن في كثير من التطبيقات يتطلب الأمر استخدام أسلاك بأشكال وأطوال مختلفــة للحصــول علــى مواصفات محددة للهوائيات. إن أبسط وأشهر أنواع الهوائيات السلكية هو سلك يبلغ طوله نصف طول الموجة المراد بثها أو إلتقاطها ويتم ربط خط النقل بهذا الهوائي عند منتصفه وذلك بعد قطعه إلى نصفين ويسمى هــذا النوع هوائي نصف الموجــة ثنــائي القطبيــة (half-wave dipole antenna) ولقــد تــم اختــراع هــذا الهوائي على يد عالم الفيزياء الألماني هينرتش هيرتز (Heinrich Hertz) وذلك في عام 1886م. وتبلــغ مقاومة الدخل لهذا الهوائي 75 أوم ولهذا السبب نجــد أن كثير من خطوط النقل لها معاوقة مميزة تبلــغ 75 أوم لكي تتوائم مع هذا النوع من الهوائيات عند ربطها بها. وفي هذا النوع يكون البث أو الاستقبال أعلى ما يكون في الاتجاه المتعامد مع السلك ويقل تدريجيا إلــى أن يصل إلى الصفر في الاتجاه الموازي للسلك ولذا يستخدم هذا الهوائي في جميع المرسلات التي يكون البث فيها في جميع الاتجاهات الموازية لسطح الأرض أو في المستقبلات التي تلتقط إشاراتها من جميع الاتجاهات كما في أجهزة إرسال واستقبال البث الراديوية والتلفزيونية والهواتف الخلوية.



ويوجد أشكال معدلة لهذا الهوائي لتتناسب مع بعض التطبيقــات مثــل الهــوائي الســوطي (whip antenna) والذي يتكون من سلك يبلغ طوله ربع طول الموجة ويتم تغذيته بخط النقــل عنــد طرفــه وعنــد وضعه فوق سطح معدني وربط الطرف الثاني من خط النقل بالسطح المعدني فإنه يعمــل كــالهوائي ثنــائي القطبية ويكثر استخدام هذا النوع في المركبات. وفي هوائي ثنائي القطبية المطــوي (folded dipole) يــتم ثني سلك بطول أطول قليلا من طول الموجة ليصبح علــى شكل حلقة مستطيله بطول يساوي نصــف طــول الموجــة وبعرض يقل كثيرا عن طول الموجة ويتم ربط خط النقــل بمنتصف أحد ضلعي المســتطيل الطــويلين بعــد فتحــه. ويستخدم هذا النوع في هوائيات استقبال التلفزيــون وذلــك بسبب ارتفاع عرض نطاقه (مدى التــرددات التــي يمكــن للهوائي التقاطها بكفاءة) بالمقارنة مع هوائي ثنائي القطبيــة العادي ولكن عيبه أن مقاومته ترتفع إلى 300 أوم بدلا مــن 75 أوم ولذلك يحتاج لدائرة موائمة لربطه مع خطوط النقل الدارجة والتي تبلغ مقاومتها 75 أوم.

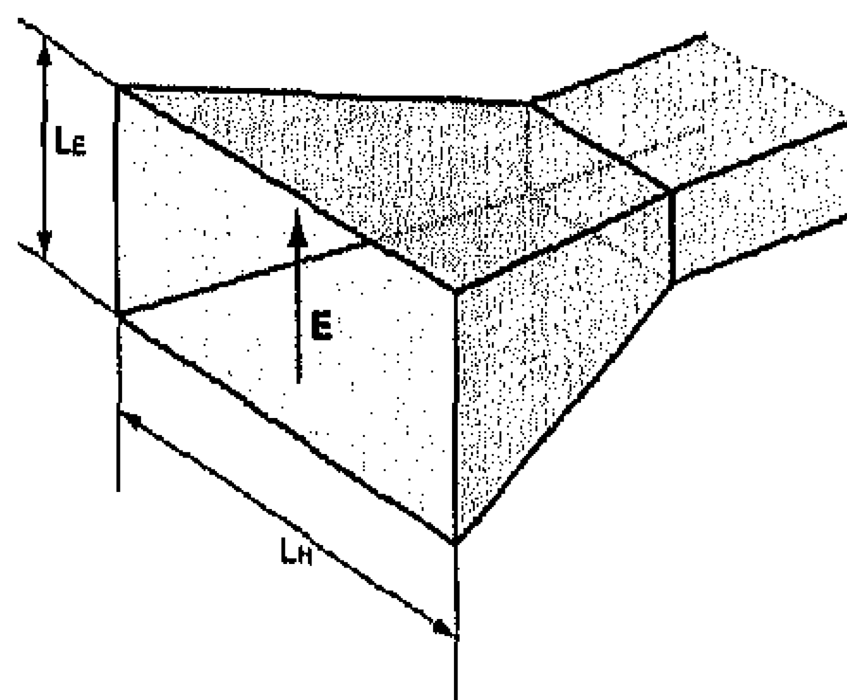


وتستخدم الهوائيات المصفوفة (array antennas) لزيادة قدرة الهوائيات في البث أو الإستقبال من اتجاه واحد وفي هذه الهوائيات يتم استخدام عدد كبير من الهوائيات ثنائية القطبية مرتبة على شكل مصفوفة توضع هذه الهوائيات بشكل متوازي ويفصل بينها مسافات محددة. ويتم تحديد إتجاه البث أو الاستقبال من خلال تحديد المسافات الفاصلة بين الهوائيات والكيفية التي يتم بها تغذية هذه الهوائيات بالتيارات من حيث قيم هذه التيارات وأطوارها بالنسبة لبعض البعض. ومن أبسط أنواع الهوائيات المصفوفة هي النوع المستخدم لإستقبال الإشارات التلفزيونية والمسمى هوائي ياغي- يودا (Yagi - Uda antenna) نسبة للمخترعين اليابانيين الذين اخترعا هذا النوع في عام 1930م. ويمكن التحكم باتجاه البث إلكترونيا وليس يدويا في الهوائيات المصفوفة من خلال التحكم بأطوار التيارات المغذية لعناصر هذه المصفوفة إلكترونيا ولذا تسمى هوائيات المصفوفة الطورية (phased array antennas) وهناك أنواع أخرى لا حصر لها من الهوائيات السلكية تصمم لأغراض مختلفة وعند ترددات مختلفة كالهوائيات الحلقية (loop antenna) والمربعة (square antenna) واللولبية (helix antenna).

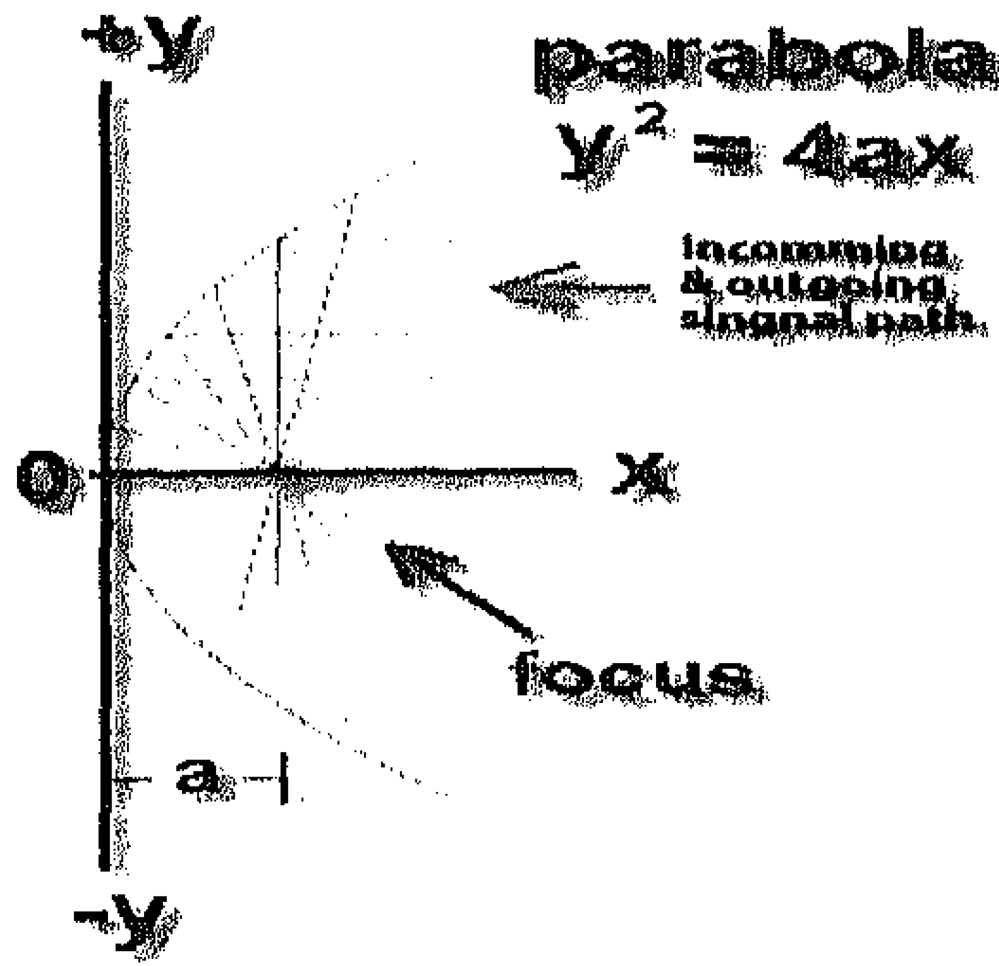


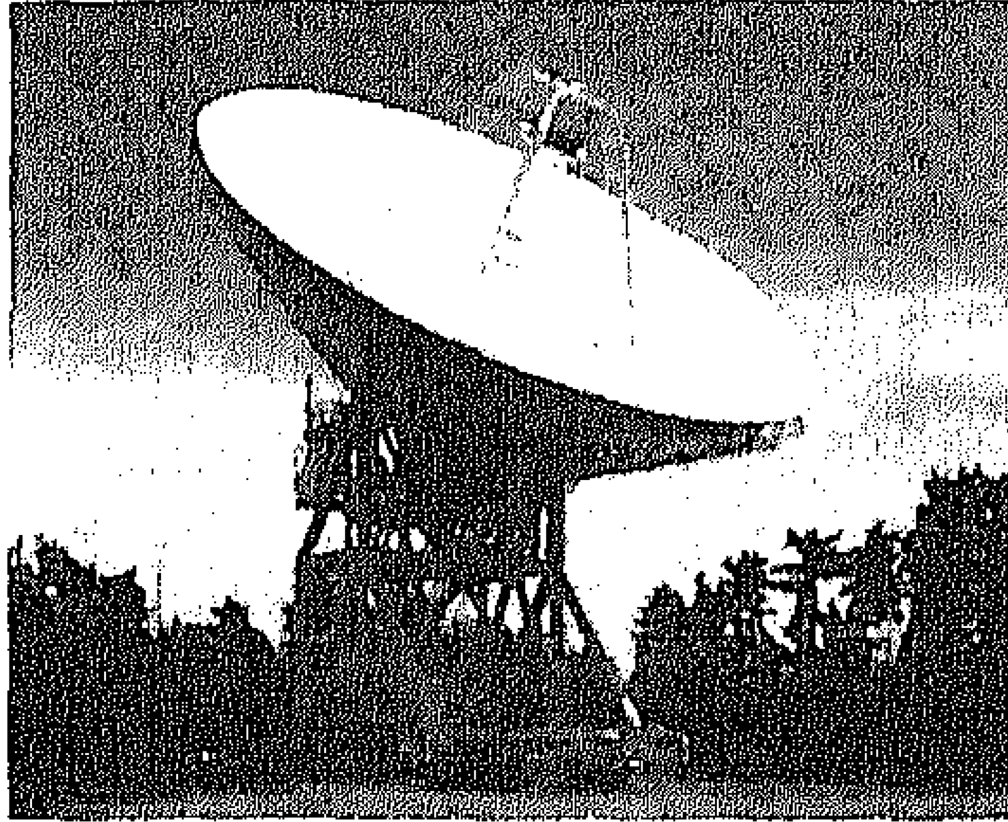
الهوائيات البوقية والصحنية (Horn & Dish Antennas)

نظرا لأن أبعاد الهوائيات يجب أن لا تزيد عن نصف طول الموجة التي تبثها أو تستقبلها فإن الهوائيات السلكية تصبح صعبة التصنيع وقليلة الكفاءة عند الترددات التي تزيد عن ألف ميغاهيرتز حيث يبلغ طول الموجة عند هذا التردد ثلاثين سنتيمتر. ولذلك فإن الموجات التي يزيد ترددها عن واحد جيقاهيرتز أي في مدى الموجات الدقيقة (microwave) تستخدم مرشدات الموجات (wave guides) لنقلها والهوائيات القرنية والصحنية لبثها أو إلتقاطها. فالهوائيات القرنية ما هي إلا مرشدات أمواج يتم زيادة أبعاد فوهتها (aperture) بشكل تدريجي ابتداءا من أبعاد مرشد الأمواج الذي يغذيها وتأتي على عدة أشكال كالهوائي الهرمي (pyramid) والهوائي المخروطي (conical). وتبث هذه الهوائيات الموجات بشكل موجه وذلك بالاتجاه العامودي على فوهة الهوائي ويتحدد مقدار كسب الهوائي من مساحة الفوهة وطول القرن وهي المسافة من نقطة التغذية إلى الفوهة. وعلى الرغم من أنه يمكن الحصول على قيم عالية للكسب باستخدام هذه الهوائيات إلا أن أبعادها تصبح كبيرة جدا وتستهلك كمية كبيرة من المعدن. ولهذا السبب فإن هذه الهوائيات القرنية غالبا ما تستخدم كهوائيات ابتدائية (primary antennas) وبأحجام صغيرة لتغذية الهوائيات الصحنية والتي تتميز بكسبها العالي بأقل مساحة معدنية ممكنة.



والهوائي الصحني هو سطح معدني يتم تشكيله على شكل قطع مكافئ ولذلك تسمى أيضا الهوائيات ذات القطع المكافئ (parabolic antennas). وعندما تسقط موجة سطحية مستوية (uniform planewave) على هذا السطح فإنها تنعكس عنه وتتجمع في بؤرته حيث يتم جمعها بالهوائيات القرنية وإذا ما استخدمت كهوائي إرسال فإنه يتم وضع الهوائي القرني عند بؤرة الصحن وعند إشعاع هذا الصحن بالموجة المنبعثة من الهوائي الإبتدائي فإنها تنعكس عنه على شكل خطوط مستقيمة مما يؤدي للحصول على كسب عالي. ويتناسب كسب الهوائيات الصحنية (G) مع مربع حاصل قسمة قطر فوهة الصحن (D) على طول الموجة المستخدمة(λ) أي ($G=\eta(\pi D/\lambda)^2$) حيث أن λ هو ثابت التناسب والذي تتراوح قيمته بين 0.5 و 0.7 في الهوائيات العملية. ومن الواضح من معادلة الكسب أنه إذا كان قطر الصحن ثابتا فإننا نستطيع رفع مقدار الكسب من خلال زيادة التردد حيث أن طول الموجة يتناسب عكسيا مع مقدار التردد. وتستخدم الهوائيات الصحنية في معظم الأنظمة التي تعمل في مجال الموجات الدقيقة كأنظمة الميكروويف الأرضي وأنظمة الأقمار الصناعية وأنظمة الرادار والتلسكوبات الراديوية وتتراوح أقطار الصحون المستخدمة في هذه الأنظمة من عدة عشرات من السنتيمترات كما في الصحون المستخدمة في إلتقاط الإشارات التلفزيونية من الأقمار الصناعية إلى مائة متر في التلسكوبات الراديوية (radio telescopes).



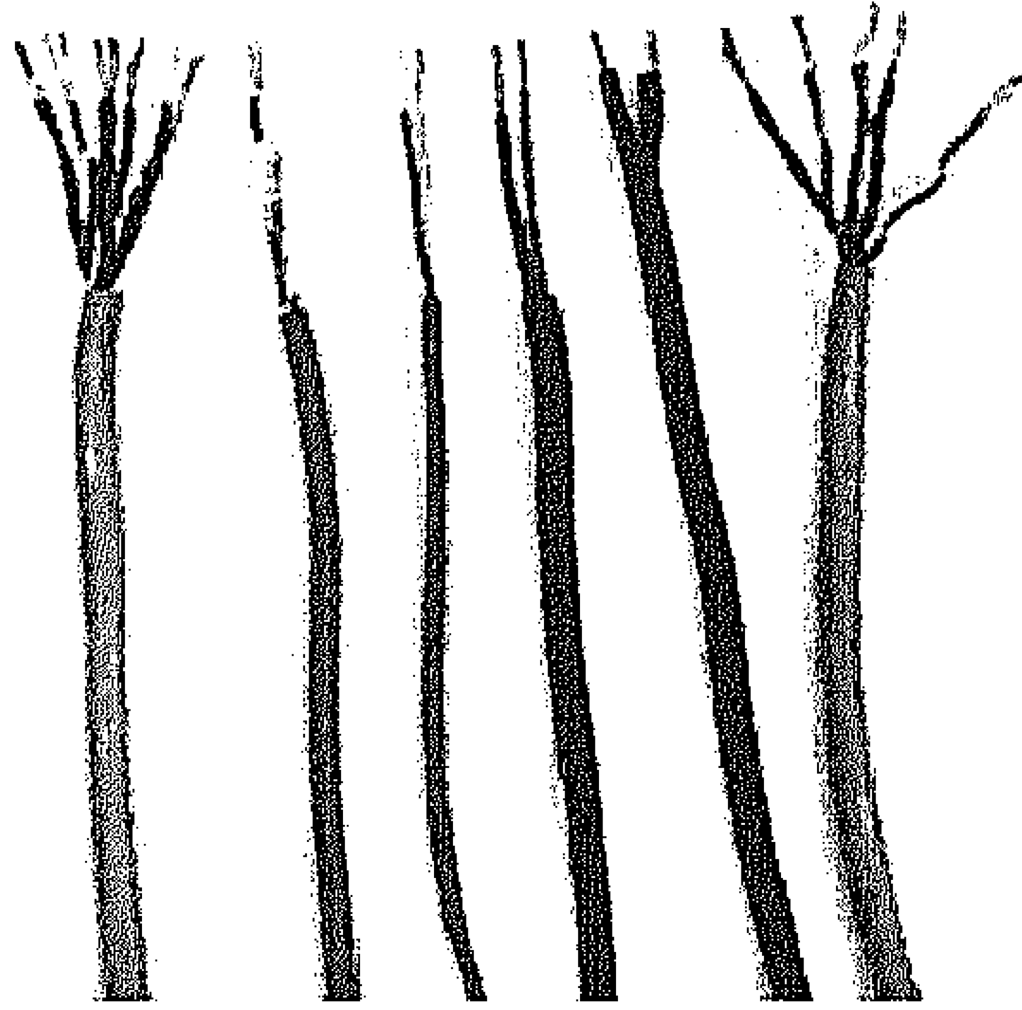


6-2 خطوط النقل (Transmission Lines)

تستخدم خطوط النقل لنقل الطاقة الكهربائية أو إشارات المعلومات والتحكم والقياس من مكان إلى مكان وفي هذا النوع من النقل تقوم الأسلاك بمختلف أنواعها بتقييد حركة الإشارات الكهربائية المنقوله بحيث تتبع مسار هذه الأسلاك. وهذا النقل السلكي (wire) هو على العكس من النقل اللاسلكي (wireless) باستخدام الموجات الكهرومغناطيسية الحرة والتي لا يمكن التحكم بمسارها بمجرد إطلاقها من الهوائيات. ويوجد بعض السيئات لهذا النوع من النقل السلكي وهي الكلفة العالية والتأخير الزمني الكبير الذي يتطلبه مد مثل هذه الأسلاك وكذلك عرضتها للقطع بقصد أو بغير قصد مما يلحق الضرر بمستخدمي هذه الأسلاك. وفي مقابل هذه السيئات يوجد بعض الحسنات منها قدرتها على نقل كميات كبيرة من الطاقة كما هو الحال في خطوط نقل الطاقة الكهربائية ومنها قدرتها على إيصال إشارات المعلومات لمسافات بعيدة بأقل قدرة ممكنه وكذلك نقل المعلومات بسرية تامة إذا ما تم دفن الأسلاك في الأرض أو تعليقها في الهواء بشكل آمن. ويوجد عدة أنواع من خطوط النقل تتفاوت تفاوتا كبيرا في خصائصها أهمها مدى الترددات التي يمكن لها أن تنقلها وكمية الفقد التي تتعرض له الإشارات المنقولة عليها. وتنقسم خطوط النقل إلى قسمين رئيسين القسم الأول له القدرة على نقل الموجات الكهرومغناطيسية بترددات تبدأ من الصفر أي أنها قادرة على نقل التيار الثابت وهذا القسم يتطلب وجود سلكين على الأقل سلك للتيار الذاهب والآخر للتيار الراجع وتكون الموجة المحموله فيهما من

نوع يسمى نمط الموجة الكهرومغناطيسية المستعرضة ((transverse electromagnetic wave(TEM)) أي أن اتجاه المجالين الكهربائي والمغناطيسي يكون متعامدا على اتجاه انتشار الموجة. أما القسم الثاني فليس له القدرة على نقل التيار الثابت ولا ينقل إلا الموجات التي يزيد ترددها عن حد معين يسمى تردد القطع (cutoff frequency) وهذا القسم لا يتطلب وجود سلكين بل يحتاج إلى موصل مجوف واحد فقط كما في مرشدات الأمواج (waveguides) وفي هذا الحال لا يمكن أن يكون اتجاه كلا المجالين الكهربائي والمغناطيسي متعامدا مع اتجاه انتشار الموجة بل أحدهما فقط إما نمط الموجة ذات المجال الكهربائي المستعرض ((transverse electric wave(TE)) وإما نمط الموجة ذات المجال المغناطيسي المستعرض ((transverse magnetic wave(TM)). إن أهم خصائص خط النقل هو ما يسمى المعاوقة المميزة (characteristic impedance) والتي يستفاد منها عند ربطها بمختلف الأجهزة حيث يجب أن تتساوى معاوقة الخط بمعاوقة هذه الأجهزة لكي نمنع ارتداد جزء من طاقة الموجة في حالة وجود اختلاف بين المعاوقتين.

السلك المزدوج (Wire pair)

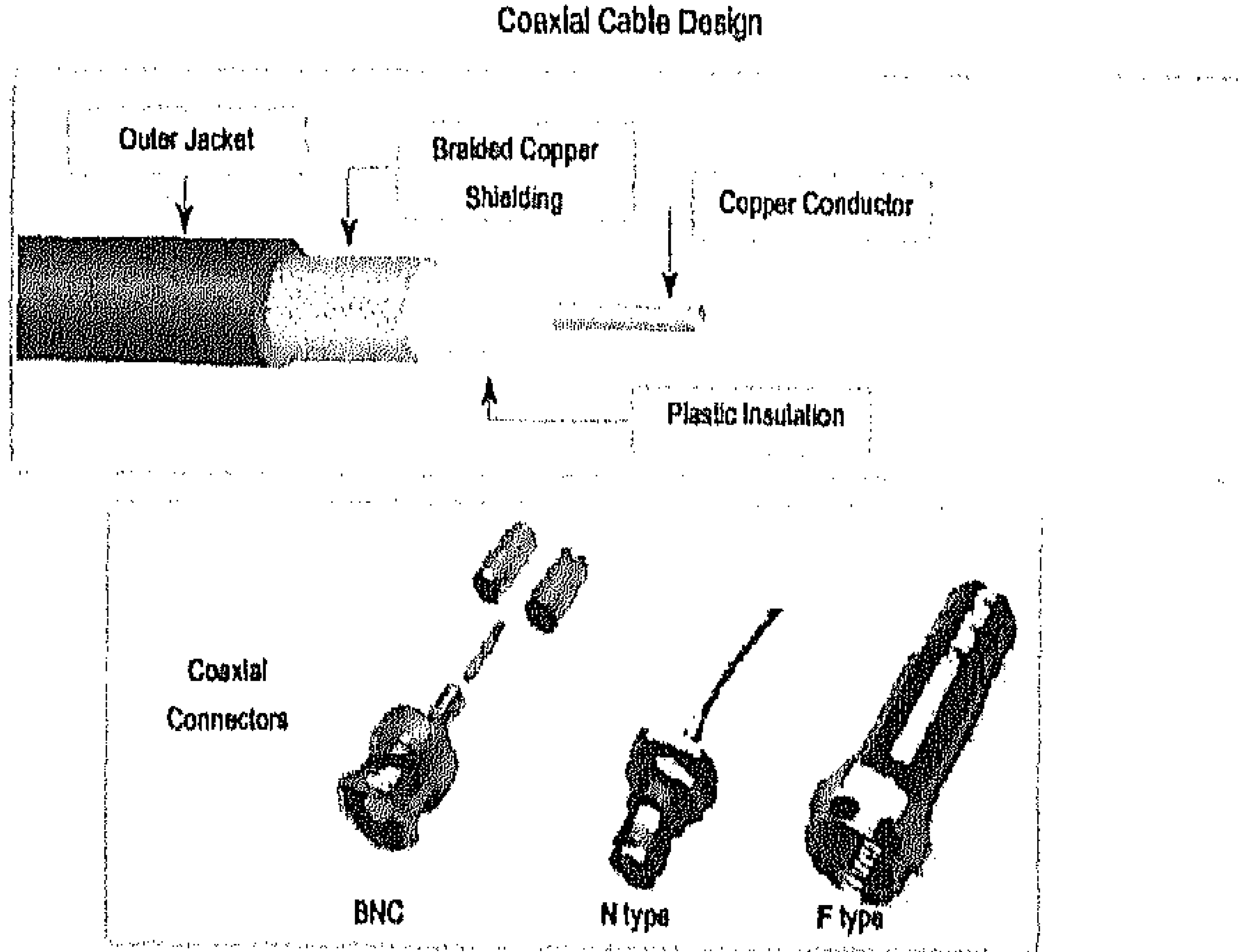


يتكون هذا النوع من خطوط النقل من سلكيين من النحاس أو الألمنيوم إما مجدولين على بعضهما أو مفصولين عن بعضهما بمسافة محددة وثابتة في الهواء أو بأي مادة عازلة. وتتحدد خصائص النقل الكهربائية للسلك المزدوج من قيمة قطر كل من السلكيين ونوع المعدن المصنوع منه ومقدار المسافة بينهما ونوع العازل الذي يغلفهما أو يفصل بينهما. والسلك المزدوج هو عبارة عن قناة اتصال ذات تمرير منخفض يسمح بمرور الترددات ابتداء من الصفر وانتهاء بتردد حدي قد يصل إلى عدة آلاف من الكيلوهيرتز في بعض الأنواع المحسنة. ويزداد الفقد في السلك المزدوج بشكل كبير مع زيادة التردد وذلك بسبب زيادة مقاومة الأسلاك المعدنية الناتج عن التأثير السطحي (skin effect) وزيادة الفقد في العازل وكذلك زيادة الفقد بسبب إشعاع جزء من طاقة الموجة إلى الفضاء. ويجب أن يراعى هذا التفاوت الكبير في قيمة ثابت الفقد للسلك المزدوج عند استخدامه في نقل إشارات المعلومات حيث يؤدي هذا التفاوت إلى تشوه كبير في شكل الإشارات المنقولة وعلى جهاز الاستقبال القيام بإزالة هذا التشوه بدوائر خاصة. ومن عيوب السلك المزدوج أن المجال الكهرومغناطيسي الناتج عن الإشارة المنقولة عبره ينتشر في الفضاء المحيط بها مما يؤدي إلى ظاهرة التداخل بين الإشارات المنقولة في الأسلاك المتجاورة بحيث يمكن أن يتسمع مشترك ما على مكالمة مشترك آخر ويطلق على هذه الظاهرة في أنظمة الهاتف بظاهرة التسمع (cross talk). وهناك عيب آخر في السلك المزدوج وهو أن سرعة انتشار الإشارات من خلاله تقل بشكل كبير عن سرعة انتشار الضوء في الفراغ فقد تصل في بعض الأنواع المزودة بملفات التقوية إلى عشر هذه القيمة مما يسبب تأخيرا زمنيا كان يظهر تأثيره السيئ بوضوح في أنظمة الاتصالات الهاتفية القديمة هذا إلى جانب اعتماد سرعة الانتشار على تردد الإشارة مما يحدث تشويها في شكل الإشارة المنقولة. أن أكثر استخدامات السلك المزدوج هو في أنظمة الاتصالات الهاتفية حيث كان في الأنظمة القديمة

قناة الاتصال الوحيدة في جميع مراحل نقل المكالمات أما في الأنظمة الحديثة فلا يستخدم إلا في الوصلة الأخيرة من الشبكة وهي التي تربط منزل المشترك بالمقسم وبطول قد لا يتجاوز خمسة كيلومترات على الأكثر. وغالبا ما تكون هذه الأسلاك في كبلات يحوي بعضها مئات وبعضها الآخر آلاف الأسلاك المزدوجة وعلى شكل مجموعات تخرج من المقسم وتتفرع شيئا فشيئا حتى يصل سلك مزدوج واحد لكل منزل من منازل المشتركين.

الكبلات المحورية (Coaxial Cables)

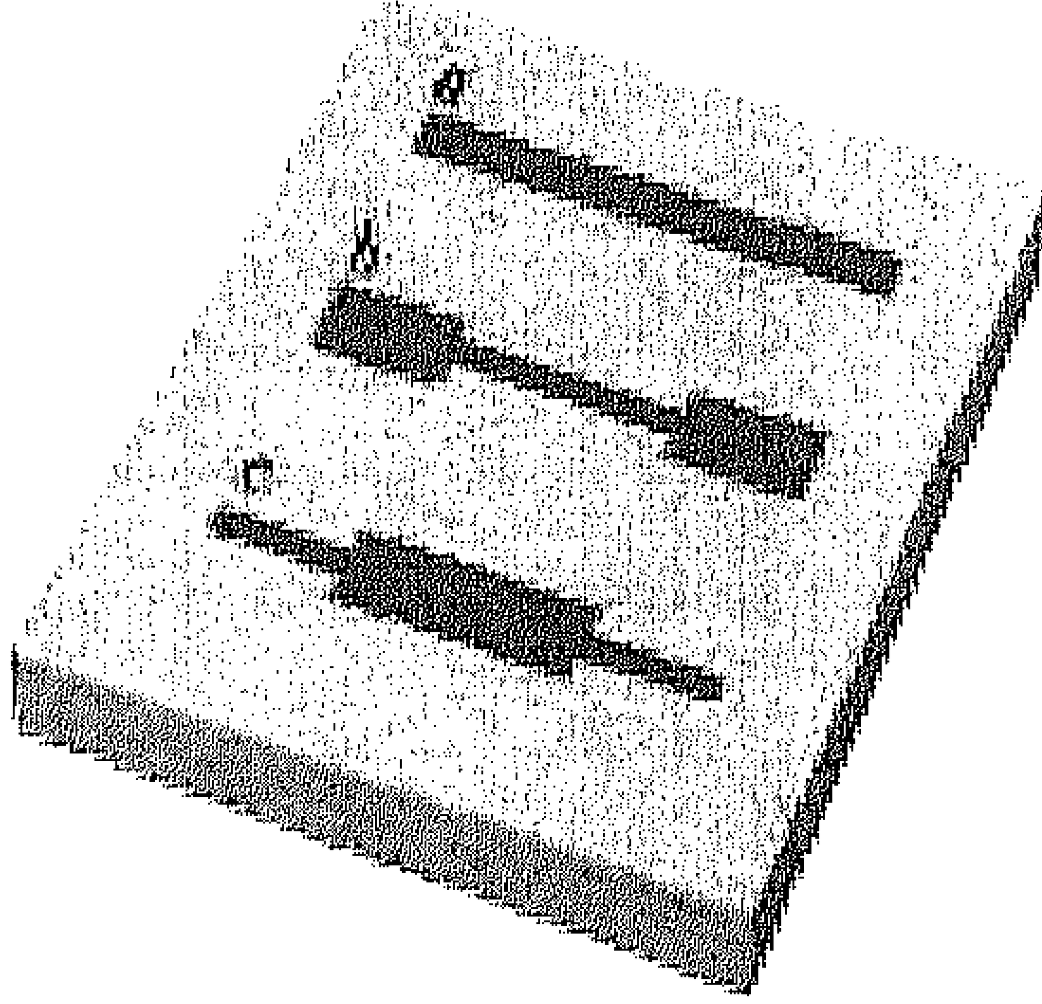
لقد تم اختراع الكيبل المحوري على يد الإنكليزي أولفر هيفيسايد وذلك في عام 1880م ولكن بسبب غياب طرق تصنيع فعالة تأخر استخدامه إلى الثلاثينيات من القرن العشرين عندما تم استخدامه لنقل الإشارات التلفزيونية حيث لم يكن بالإمكان نقلها بالأسلاك العادية. يتكون هذا النوع من خطوط النقل من موصلين من النحاس أو الألمنيوم أحدهما خارجي أنبوبي الشكل وفي مركزه يوضع الموصل الداخلي الذي يثبت إما بحلقات عازلة متباعدة على طول محور الكبل أو مادة عازلة (dielectric insulator) تملأ جميع الفراغ بين الموصلين وعادة ما يتم تغليف الموصل الخارجي بطبقة بلاستيكية عازلة (plastic jacket). ويتم ربط الكيبلات المحورية ببعضها البعض أو بالأجهزة باستخدام وصلات خاصة (coaxial connectors) تعمل على تقليل الفقد الناتج عن عملية الربط. وتتحدد خواص النقل الكهربائية للكبل المحوري من مقدار القطر الداخلي للموصل الخارجي والقطر الخارجي للموصل الداخلي ونوع المادة العازلة بينهما فكلما زاد قطر الكبل كلما زاد عرض نطاق التمرير ونقص معامل الفقد فيها مما يؤهلها لحمل عدد كبير من إشارات المعلومات ولمسافات طويلة.



والكبل المحوري هو قناة اتصال ذات تمرير منخفض يسمح بمرور الترددات ابتداء من الصفر وانتهاء بتردد حدي قد يصل إلى ألفين ميغاهيرتز في الكبلات المحورية التي قد يصل قطرها الخارجي إلى أكثر من أربعة سنتيمرات. وتمتاز الكبلات المحورية إلى جانب قلة فقدها وكبر عرض نطاقها بقلة تأثير الضوضاء على الإشارات المحمولة فيها وانعدام التداخل كذلك بين الإشارات المحمولة في الكبلات المتجاورة ويعود السبب في ذلك لانحصار المجال الكهرومغناطيسي في داخل الأنبوب الخارجي وذلك على العكس من السلك المزدوج الذي يملأ مجاله جميع الفضاء المحيط به. أما سرعة انتشار الإشارات خلالها فهي تقل قليلا عن سرعة انتشار الضوء في الفراغ ومن النادر أن تهبط عن 90% من سرعة الضوء . وتنتج الكبلات المحورية الآن بقيمتيين لمعاوقتها المميزة أحدهما 50 أوم وهي المقاومة التي تستخدم في معظم أجهزة الاتصالات والأخرى 75 أوم والتي تستخدم في أنظمة بث واستقبال الإشارات التلفزيونية. وتستخدم هذه

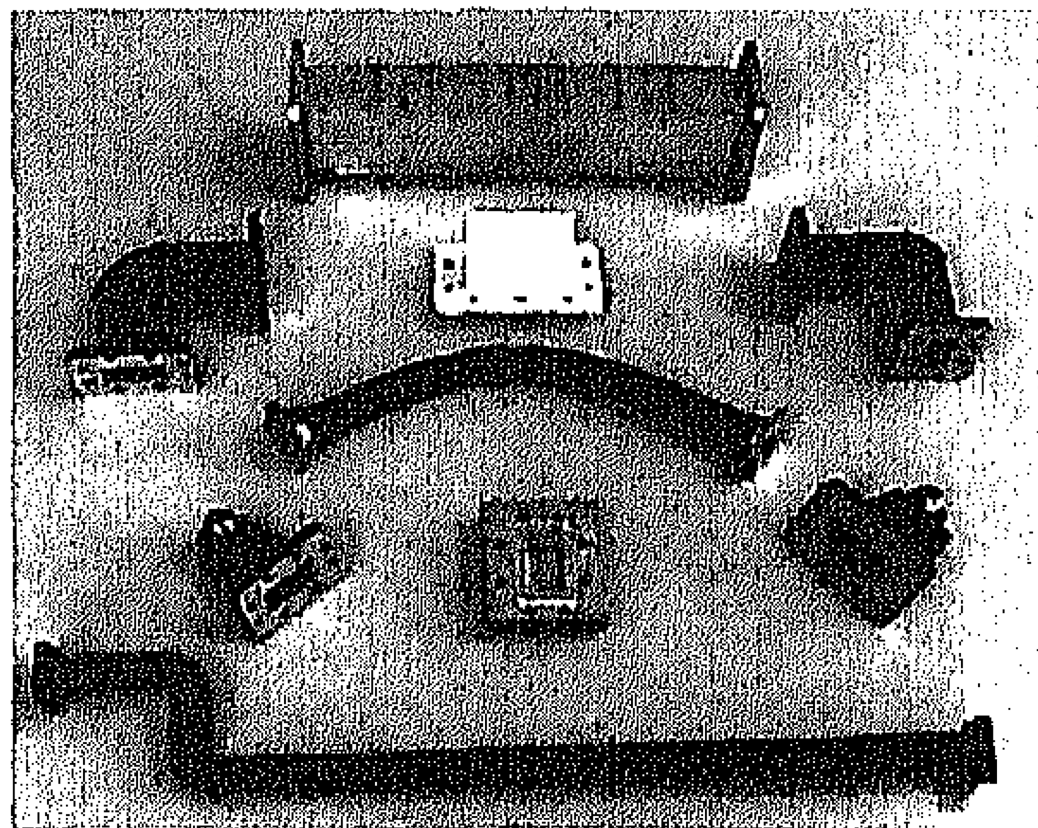
الكبلات المحورية في أنظمة الاتصالات الكهربائية لنقل الإشارات بين المرسلات والهوائيات وما بين الهوائيات والمستقبلات وفي أجهزة القياس الكهربائية وفي شبكات الحاسوب وفي أنظمة الاتصالات البحرية فيما بين القارات إلا أن الألياف الضوئية بدأت تحل محلها في كثير من أنظمة الاتصالات.

الشرائط الدقيقة (Microstrips) والخطوط الشريطية (Strip Lines)



الشريط الدقيق (microstrip) هو خط نقل بموصلين يستخدم غالبا في لوحات الدوائر المطبوعة (printed circuit boards) لربط المكونات الإلكترونية الموجودة على هذه اللوحات. وهو عبارة عن شريط معدني دقيق يتم ترسيبه على سطح لوحة عازلة ليكون الموصل الأول لخط النقل بينما يستخدم السطح المعدني المرسب على الوجه الآخر للوحة كموصل أرضي مشترك لجميع الشرائط الموجودة على سطح اللوحة. ونظرا لقصر طول هذه الأشرطة فإنها قادرة على نقل إشارات كهربائية بترددات عالية جدا تصل إلى مدى الأمواج الدقيقة. ومن سيئات هذه الشرائط أن الإشارات المحمولة عليها قد تتداخل مع بعضها البعض فتشوش على بعضها أو حتى على اللوحات المجاورة بسبب أنها قد تعمل كهوائيات تبث جزءا من الإشارات التي تحملها أو تلتقط الإشارات الموجودة في الفضاء المحيط بها. وللتغلب على هذه المشكلة تم استخدام ما يسمى بالخطوط الشريطية (strip lines) التي تختلف عن الشرائط الدقيقة بوجود لوحين معدنيين كموصل أرضي مشترك يحيطان بالخطوط الشريطية أحدهما من الأعلى والآخر من الأسفل وبهذا يتم عزلها عن الفضاء المحيط بها فيقل بذلك التداخل مع الأجهزة المحيطة وتبقى مشكلة التداخل فيما بين الشرائط على نفس اللوحة حيث يتم إتخاذ بعض الإجراءات للتقليل منها.

مرشدات الأمواج (Waveguides)

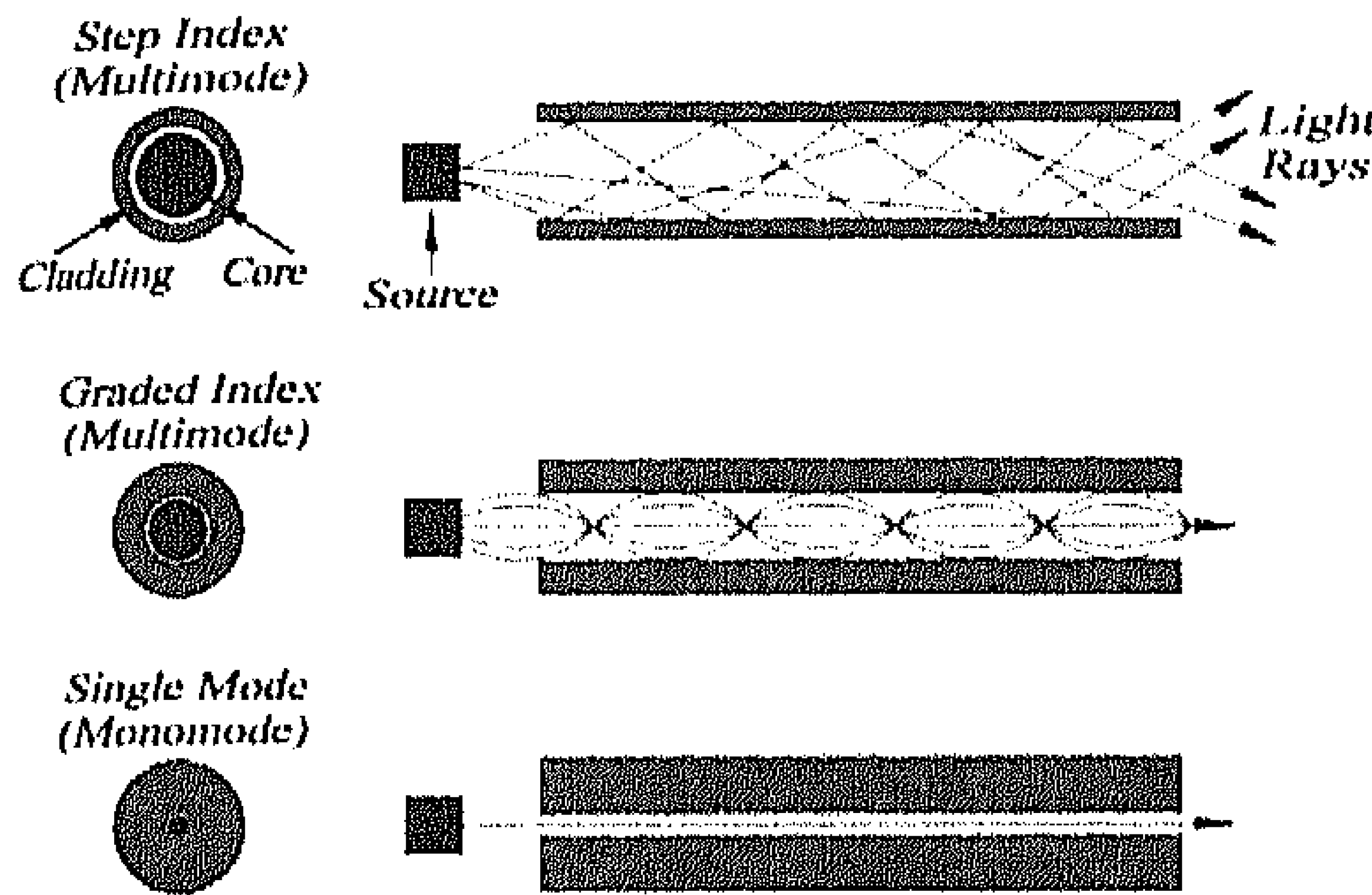


يتكون هذا النوع من خطوط النقل من موصل واحد فقط وهو على شكل أنبوب معدني من النحاس أو الألمنيوم ولمقطعه أشكال متعددة أشهرها المستطيلي(rectangular) والدائري (circular) والاهليلجي (elliptical). ونظرا لأن خط النقل هذا مكون من موصل واحد فهو لا يسمح بمرور الترددات المنخفضة ويسمح بمرور الترددات العالية ابتداء من تردد حدي معين (cutoff frequency) تحدده الأبعاد الداخلية للأنبوب فكلما زادت أبعاد الأنبوب كلما قل هذا التردد الحدي. وعلى سبيل المثال فإنه يلزم لنقل إشارات يزيد ترددها عن واحد غيغاهيرتز مرشد أمواج دائري يزيد قطره عن 15 سم بينما يبلغ قطره واحد ونصف سنتيمتر عندما يكون التردد الحدي 10 غيغاهيرتز. ولهذا فإنه من النادر استخدام مرشدات الأمواج للترددات دون 2 غيغاهيرتز وذلك لضخامة حجمها وصعوبة مدها ويستخدم

بدلا منها الكوابل المحورية على الرغم من فقدها العالي عند هذه الترددات العالية. وتستخدم مرشدات الأمواج لنقل الإشارات فيما بين الأجهزة وبين المرسلات والهوائيات في أنظمة الأمواج الدقيقة وفي أنظمة الرادار ومن النادر استخدامها لنقل الإشارات لمسافات بعيدة نظرا لارتفاع فقدها وصعوبة مدها.

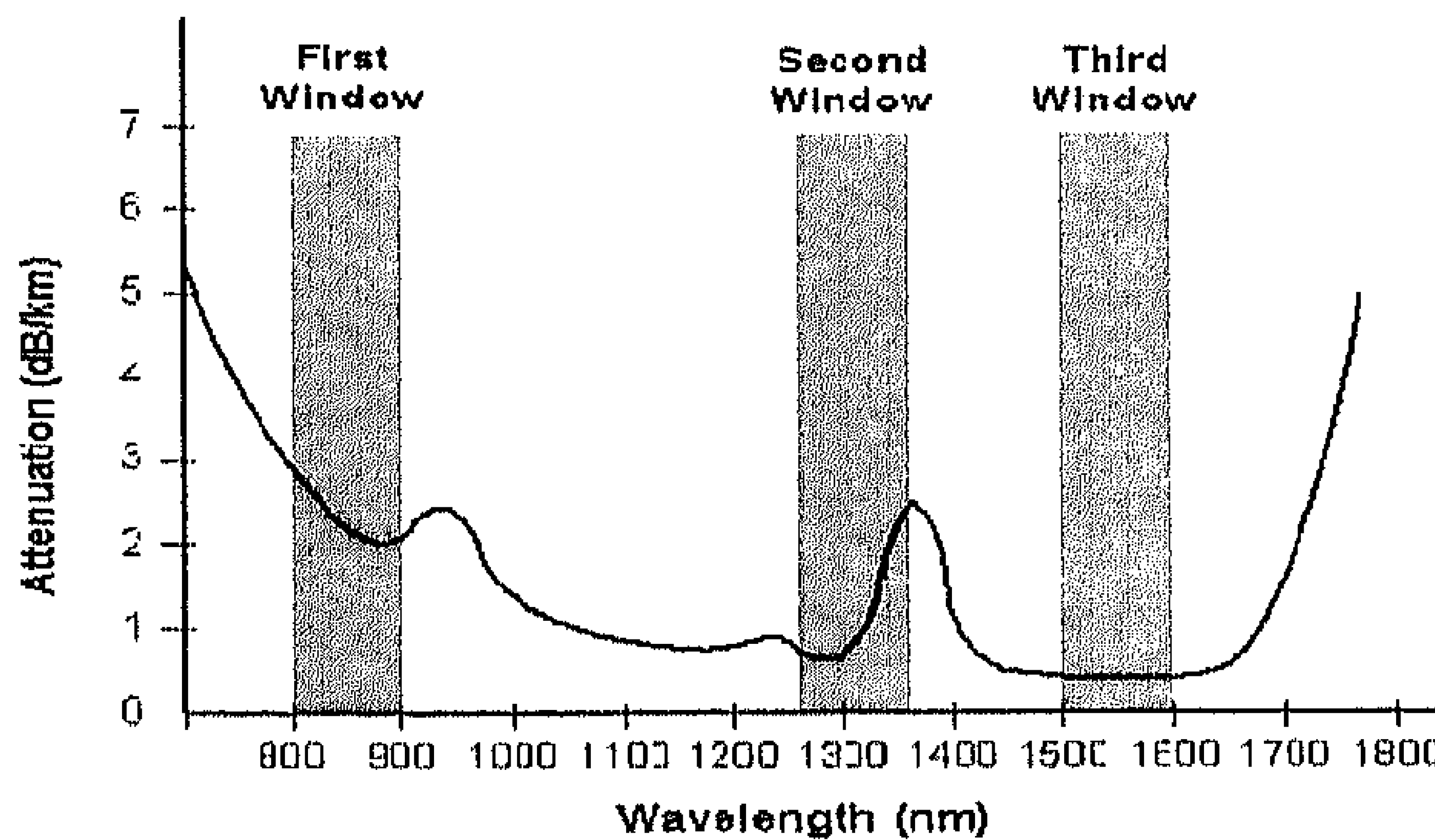
الألياف الضوئية (Optical Fibers)

في عام 1967م اقترح باحثان إنكليزيان استخدام الألياف الزجاجية كقناة اتصالات ضوئية شريطة تقليل الفقد العالي في الزجاج وذلك بالتخلص من الشوائب الموجودة فيه وفي عام 1970م تمكنت شركة أمريكية من أن تقلل فقد الزجاج من ألف ديسيبل إلى ما دون عشرين ديسيبل لكل كيلومتر فتجددت آمال المهندسين في تصميم أنظمة اتصالات ضوئية باستخدام هذه الألياف الضوئية. والليف الضوئي هو عبارة عن مرشد أمواج أسطواني الشكل مصنع كليا من الزجاج البالغ النقاء ويتكون من طبقتين طبقة داخلية تسمى القلب (core) وطبقة خارجية تسمى الغلاف (cladding) بحيث يكون معامل الانكسار القلب أعلى منه بقليل من ذلك الذي للغلاف. وتنتشر الموجات الضوئية



داخل القلب نتيجة لظاهرة الانعكاس الداخلي الكلي (total internal reflection) والتي مفادها أنه إذا سقطت موجة كهرومغناطيسية من وسط ذي معامل انكسار أعلى إلى وسط ذي معامل انكسار أقل فإن الموجة ستنعكس كليا إذا كانت زاوية السقوط أكبر من الزاوية الحرجة (critical angle). وتمتاز الألياف الضوئية على الكبلات المحورية والأسلاك النحاسية المزدوجة بقلة فقدها (low attenuation) واتساع عرض نطاقها (large bandwidth) وصغر حجمها وخفة وزنها وحصانتها ضد التداخل والتشويش ووفرة مادتها الخام وانعدام خطرها في إحداث الحرائق وعدم حاجتها للعزل إلا لأغراض حمايتها من التلف.

ويستخدم الآن في أنظمة الاتصالات الضوئية ثلاثة أنواع من الألياف الضوئية وهي الليف متعدد الأنماط ذي المعامل الفوري (step-index multi mode fiber) والذي يتراوح قطر قلبه بين 50 و100 ميكرومتر وقطر غلافه 125 ميكرومتر ويمتاز بسهولة تصنيعه وسهولة وصل الألياف ببعضها ولكن سيئته أنه يسمح بانتشار عدة مئات من الأنماط خلاله والتي تعمل على تقليل عرض نطاقه لعدة مئات ميغاهيرتز . أما النوع الثاني فهو الليف متعدد الأنماط ذي المعامل التدريجي (graded-index multi mode fiber) والذي يتراوح قطر قلبه بين 50 و60 ميكرومتر وقطر غلافه 125 ميكرومتر. وعلى



الرغم من أن هذا النوع يسمح بانتشار عدة مئات من الأنماط خلاله كما في النوع الأول إلا أن التدرج في

معامل انكسار القلب يجعل سرعات انتشار الأنماط المختلفة أكثر تقاربا منها في النـوع الأول وعليـه فـان عرض نطاقه قد يصل إلى ألف ميغاهيرتز. أما النوع الثالث فهو الليف أحادي النمط ذي المعامـل الفـوري (step-index single mode fiber) ولا يزيد قطر قلب هذا الليف عن 10 ميكرومتر وقطر غلافـه 125 ميكرومتر ولذلك فهو لا يسمح إلا لنمط ضوئي واحد للانتشار خلاله ولذلك فهو يمتاز بقدرته على نقل كميات ضخمة من المعلومات وقد يصل عرض نطاقه إلى عدة آلاف ميغاهيرتز ولكن سيئته أنـه يحتـاج لتقنيـات متقدمة لتصنيعه ولوصل الألياف ببعضها. استخدمت أنظمة اتصالات الأليـاف الضـوئية فـي جيلهـا الأول موجات الأشعة تحت الحمراء في النافذة التي تقع حول 850 نانوميتر ولكن وبسبب الفقد العالي للزجاج في هذه النافذة تم الانتقال في بداية الثمانينات إلى النافذة الثانية التي تقع حول الطـول المـوجي 1300 نـانوميتر ومن ثم تم الانتقال في بداية التسعينات إلى النافذة الثالثة التي تقع حول الطول الموجي 1550 نانوميتر حيـث يصل فقد الزجاج إلى حده الأدنى وهو خمس ديسبل لكل كيلومتر من طول الليف.

الفصل الثالث

آلات وأنظمة الطاقة الكهربائية

3-1 تمهيد

إن من أعظم الاختراعات التي اخترعها البشر على مدى تاريخهم هو اختراعهم للمولد الكهربائي حيث يقوم هذا الجهاز العجيب بتحويل مختلف أشكال الطاقة إلى شكل جديد لها لم يعهده البشر من قبل ألا وهي الطاقة الكهربائية. إن للطاقة الكهربائية خصائص غاية في العجب إلا أن عجب الناس بها قد زال مع مر السنين لطول إيلافهم إياها. فهذه الطاقة لا يمكن للبشر أن يدركوها بحواسهم أبدا ولا يمكن الكشف عن وجودها إلا من خلال الأجهزة التي تقيسها أو الأجهزة التي تعمل على تشغيلها. ولو قدر لأحد أن يقول لشخص لا علم له بوجود الكهرباء أبدا أن سلكا رفيعا ومعرى موصول بمصدر للطاقة الكهربائية سيقتله إذا ما لمسه بيده فإن هذا الشخص لا بد وأن يسخر منه فكيف يمكن لهذا السلك الساكن الذي لا حول له ولا قوة أن يقتله! ومن عجائب الطاقة الكهربائية أنه يمكن نقلها من خلال سلكين معدنيين لا يتجاوز قطر الواحد منهما عدة ملليمترات ولأي مسافة نريدها من مصدر توليدها. أما سرعة نقل هذه الطاقة فتبلغ قريبا من سرعة الضوء أي ثلاثمائة ألف كيلومتر في الثانية فعلى سبيل المثال فعندما يقوم الشخص بكبس زر لتشغيل جهاز ما في بيته يعمل بالطاقة الكهربائية المتولدة من محطة توليد تقع على بعد ثلاثمائة كيلومتر فإن المولد الكهربائي سيحس بوجود حمل جديد عليه بعد مرور مللي ثانية تقريبا فيعمل على الفور بتوليد كمية الطاقة المطلوبة تماما وستصل هذه الطاقة لجهاز الشخص بعد مرور مللي ثانية أخرى. وفي المقابل نجد أن جميع أشكال الطاقة الأخرى غير الكهرباء تحتاج لوسائل نقل مختلفة وبسرعات نقل بطيئة وذلك لنقلها من أماكن توفرها إلى أماكن استهلاكها وعند وصولها تحتاج لأماكن لتخزينها بينما لا تحتاج الطاقة الكهربائية للتخزين بل تصل في لمح البصر حين تطلبها.

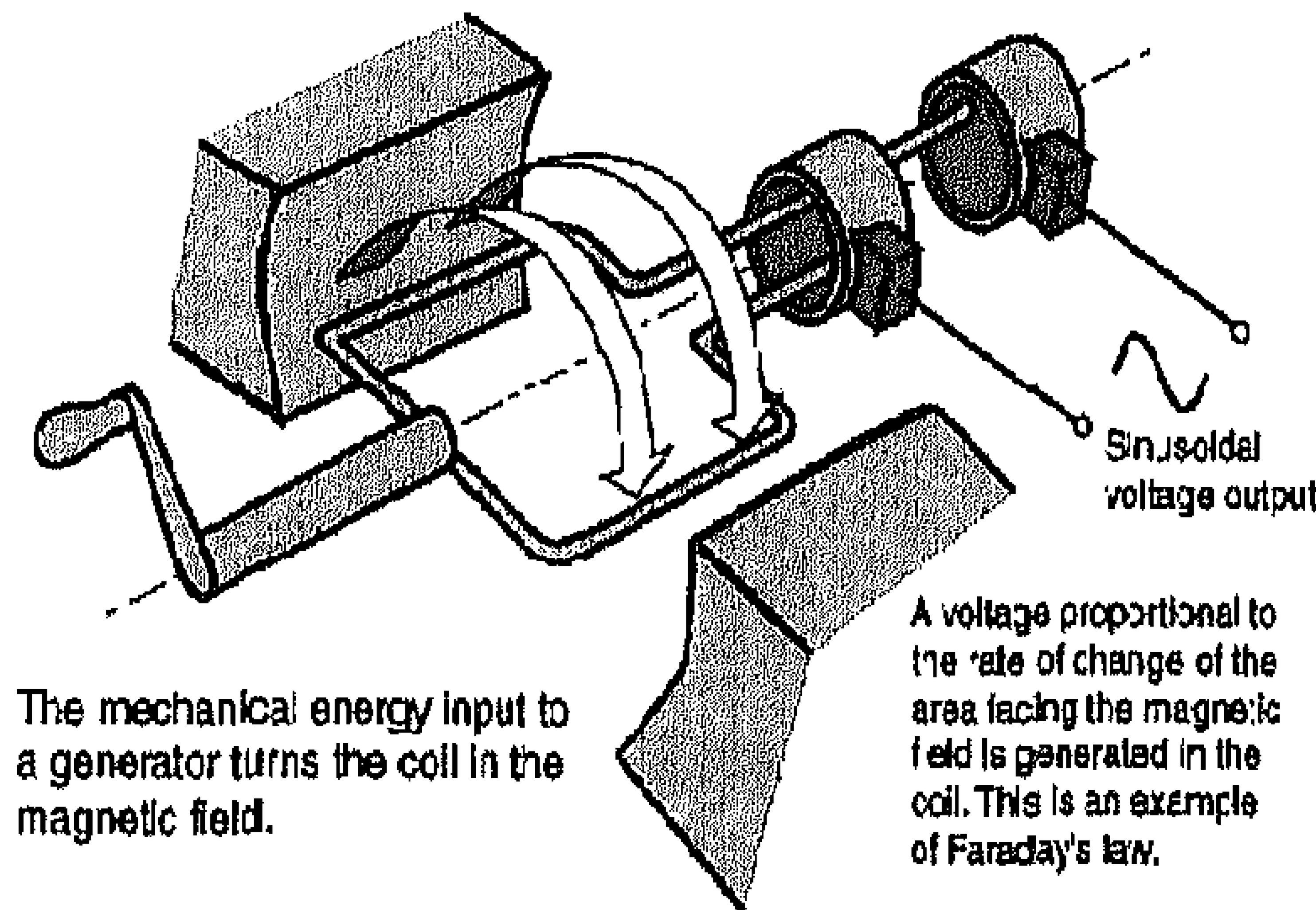
ومن ميزات الطاقة الكهربائية أيضا إمكانية إنشاء المحطات الكهربائية حيث تتوفر مصادر الطاقة المختلفة وخاصة تلك التي لا يمكن نقل طاقتها إلى أماكن استخدامها كالطاقة الحركية في مياه الأنهار وطاقة المد والجزر والطاقة الحرارية في جوف الأرض وطاقة الرياح. وحتى في الأنواع التي يمكن نقلها كالفحم الحجري والبترول والغاز فإن كلفة نقلها بعد تحويلها إلى طاقة كهربائية قد تكون أقل من كلفة نقلها بشكلها الأصلي والذي يتطلب إنشاء شبكات طرق أو سكك حديدية أو مد أنابيب معدنية وكذلك توفير أعداد كبيرة من القطارات والشاحنات والصهاريج ومحطات الضخ إلى جانب توفير مستودعات ضخمة لتخزينها. أما المحطات الكهربائية التي تعمل على الطاقة الذرية فمن المفضل إقامتها في مناطق بعيدة عن التجمعات السكنية لتفادي خطر الإشعاعات المنبعثة من المفاعلات في حالة تعرضها للحوادث وبحيث تكون قريبة من مصادر المياه لحاجتها إليه في عمليات التبريد. ومن ميزات الطاقة الكهربائية أنه يمكن تحويلها إلى مختلف أشكال الطاقة الأخرى كالطاقة الضوئية لإنارة البيوت والمكاتب والشوارع واالطاقة الحرارية للتدفئة وتسخين المياه والطبخ والطاقة الحركية لتشغيل مختلف أنواع الأجهزة والمعدات في البيوت والمصانع والمكاتب وحتى القاطرات والمركبات والطاقة الكيميائية كما في شحن البطاريات والطاقة الكهرومغناطيسية لتوليد

مختلف أنواع الترددات في الطيف الكهرومغناطيسي لاستخدامها في نقل ومعالجة وتخـزين مختلـف أشـكال المعلومات.

ومن ميزات مولدات الطاقة الكهربائية أنها لا تولد الطاقة إلا بالقدر الذي يحتاجه المستخدمون مضافا إليه بالطبع الطاقة المفقودة في خطوط النقل وهذا يعني أنه عندما يقوم المستهلك بكـبس زر أحـد مصـابيح الإضاءة فإن المولدات تحس بهذا الحمل وتقوم بإرسال كمية الطاقة المطلوبة دون زيـادة أو نقصـان. ويـتم تحويل الطاقة الكهربائية عند أماكن استهلاكها إلى مختلف أشكال الطاقة الأخرى باسـتخدام مختلـف أنـواع الأجهزة الكهربائية. ففي أنظمة الإنارة يتم استخدام أنواع مختلفة من المصابيح الكهربائيـة لتحويـل الطاقـة الكهربائية إلى طاقة ضوئية باستخدام مصابيح التنجستون ذات الكفاءة المتدنية ومصابيح الغـاز ذات الكفـاءة المتوسطة ومصابيح توفير الطاقة ذات الكفاءة العالية. وفي أنظمة تسخين المياه وتدفئة المنازل والمكاتب يـتم استخدام المقاومات الكهربائية لتحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة حرارية بكفاءة تصل إلى مائة بالمائة. ويـتم تحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة كيميائية عند شحن البطاريات القابلة للشحن حيث تستخدم هذه البطاريـات في مجالات مختلفة كما في المركبات والراديوات والمسجلات والهواتـف الخلويـة والحواسـيب المحمولـة وغيرها. وباستخدام الأجهزة الإلكترونية يتم تحويل الطاقة الكهربائية إلى موجات كهرومغناطيسية تمتد علـى نطاق واسع من الترددات والتي تستخدم في مختلف أنظمة الاتصـالات والحواسـيب والـتحكم والـرادارات والليزرات وفي تشخيص ومعالجة الأمراض باستخدام مختلف أنواع الأجهزة الطبية. وباسـتخدام الملفـات الكهربائية يتم تحويلها إلى مجالات مغناطيسية تلزم لتشغيل كثير من الأجهزة والمعدات كما في التلفزيونات وراسمات الذبذبات والمسارعات والمغناطيسات الكهربائية التي تستخدم في تطبيقات لا حصر لها كمـا فـي الرافعات والصمامات والكوابح والمصاعد والقطارات المغناطيسية.

2-3 المولدات الكهربائية (Electric Generators)

يعود الفضل في استغلال الكهربـاء لصالح البشر للفيزيائي والكيميائي الإنكليـزي ميشـيل فـارادي (Michael Faraday) (1791-1867م) الذي قام بـاختراع المولـد الكهربائي في عام 1831م والذي يقوم بتحويل الطاقة الحركية إلى طاقـة كهربائيـة. فقبـل اختراع المولد الكهربائي كانت البطارية التـي اخترعها فولتا في عام 1800م هي المصـدر الوحيد للطاقة الكهربائية المستمرة حيث تقـوم بتحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقـة كهربائيـة

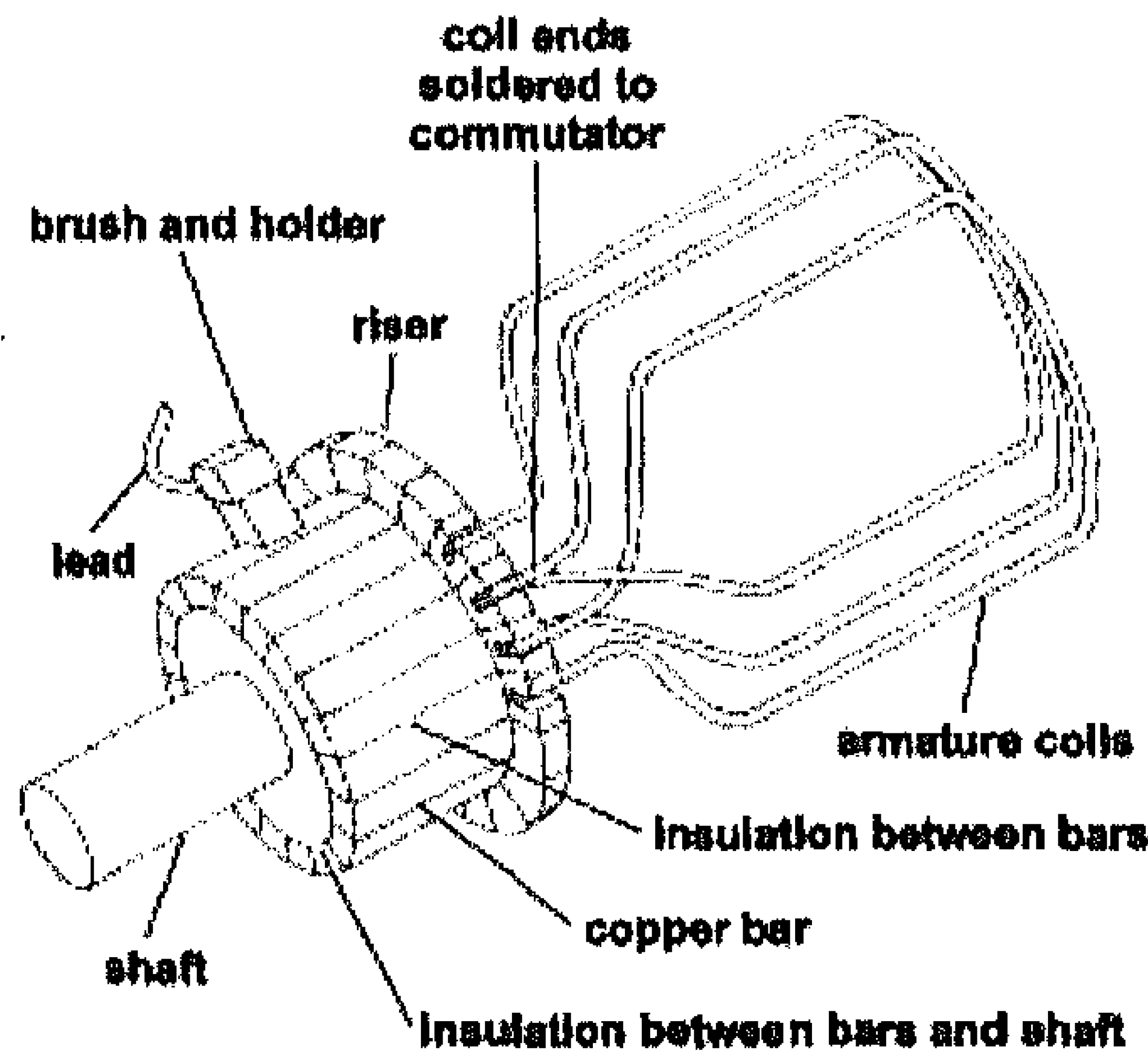


ولكن بكميات قليلة. أما المولد الكهربائي فإن بإمكانه توليد كميات كبيرة من الطاقة الكهربائية بسـبب تـوفر الطاقة الميكانيكية بكثرة في الطبيعة كما في طاقة المياه والرياح أو من خلال المحركات الميكانيكية التي تعمل بشتى أنواع الوقود. لقد برز في ذهن فارادي سؤال بالغ الأهمية وهو إذا كان بإمكان التيار الكهربائي إنتـاج

مجال مغناطيسي حوله كما اكتشف ذلك أورستد في عام 1820م فلما لا يكون بالإمكان إنتاج تيار كهربائي من المجال المغناطيسي.

وفي عام 1831م تمكن فارادي من اكتشاف أشهر قوانين الكهربائية وهو قانون الحث الكهرومغناطيسي أو ما يسمى بقانون فارادي والذي ينص على أن القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في أي دائرة كهربائية مغلقة مقاسة بالفولت تساوي معدل تغير الفيض المغناطيسي الذي يقطع تلك الدائرة مع الزمن. لقد توصل فارادي إلى هذا القانون من خلال التجربة فقد تبين له أنه عند تحريك قضيب مغناطيسي داخل ملف كهربائي فإن فرقا في الجهد يتولد بين طرفي السلك ووجد كذلك أنه عند تحريك سلك معدني أمام قضيب مغناطيسي فإن فرقا في الجهد يتولد بين طرفي السلك حيث يتناسب فرق الجهد المتولد طرديا مع شدة المجال المغناطيسي وسرعة حركة السلك في الاتجاه العامودي على اتجاه خطوط المجال المغناطيسي وكذلك طول السلك. وفي نفس العام تمكن فارادي من بناء أول نموذج مبسط للمولد الكهربائي سمي بقرص فارادي (Faraday Disk) وهو عبارة عن قرص دوار من النحاس مثبت بين قطبي مغناطيس طبيعي وعند تدوير القرص يدويا يتولد جهدا كهربائيا بين حافتيه ويتم تسليط هذا الجهد على دائرة خارجية من خلال سلكان يلامسان وينزلقان على حافتي القرص.

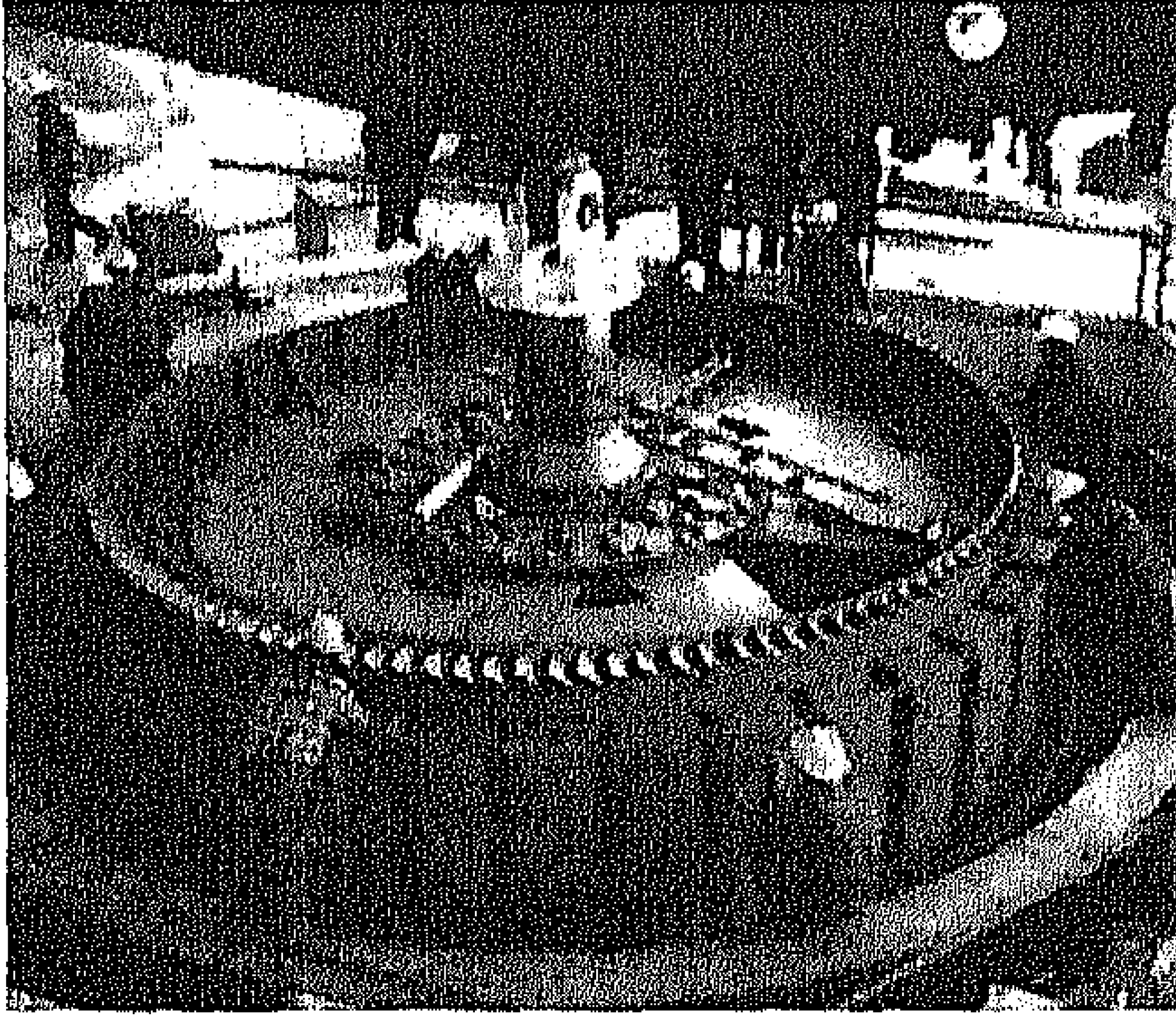
لقد أثبت فارادي بهذه المولد البسيط إمكانية تحويل الطاقة الحركية إلى طاقة كهربائية ولكن أداء هذا المولد البسيط كان سيئا جدا لأن معظم الطاقة الكهربائية المولدة تضيع على شكل حرارة في القرص بسبب ما يسمى بالتيارات الدوامه (eddy currents). وفي عام 1832م قام الفرنسي هبولايت بيكسي (Hippolyte Pixii) بتصنيع مولد تيار كهربائي متغير مبسط من خلال تحريك قطبي مغناطيس يدويا امام ملفين كهربائيين. وتوالت بعد ذلك المحاولات في كل من أوروبا وأميركا لتصنيع مولدات كهربائية عملية ولكنها لم تتكلل بالنجاح إلا بعد مرور أربعين عاما على اختراع المولد. وقد كان سبب هذا التأخير أن جهد العلماء والمهندسين قد انصب على تصنيع مولدات كهربائية تنتج تيارا مباشرا أو مستمرا (Direct Current) كالذي تنتجه البطارية. وبما أن طبيعة التيار المتولد في داخل الملفات هو من النوع المتغير أو المتناوب (Alternating Current) كان من اللازم اختراع طريقة لتحويل التيار المتناوب إلى تيار ثابت وهذا الجهاز يسمى المبدل (commutator) هذا بالإضافة إلى مشاكل فنية كثيرة كان يلزم تخطيها لتصنيع مولد كهربائي بكفاءة عالية.



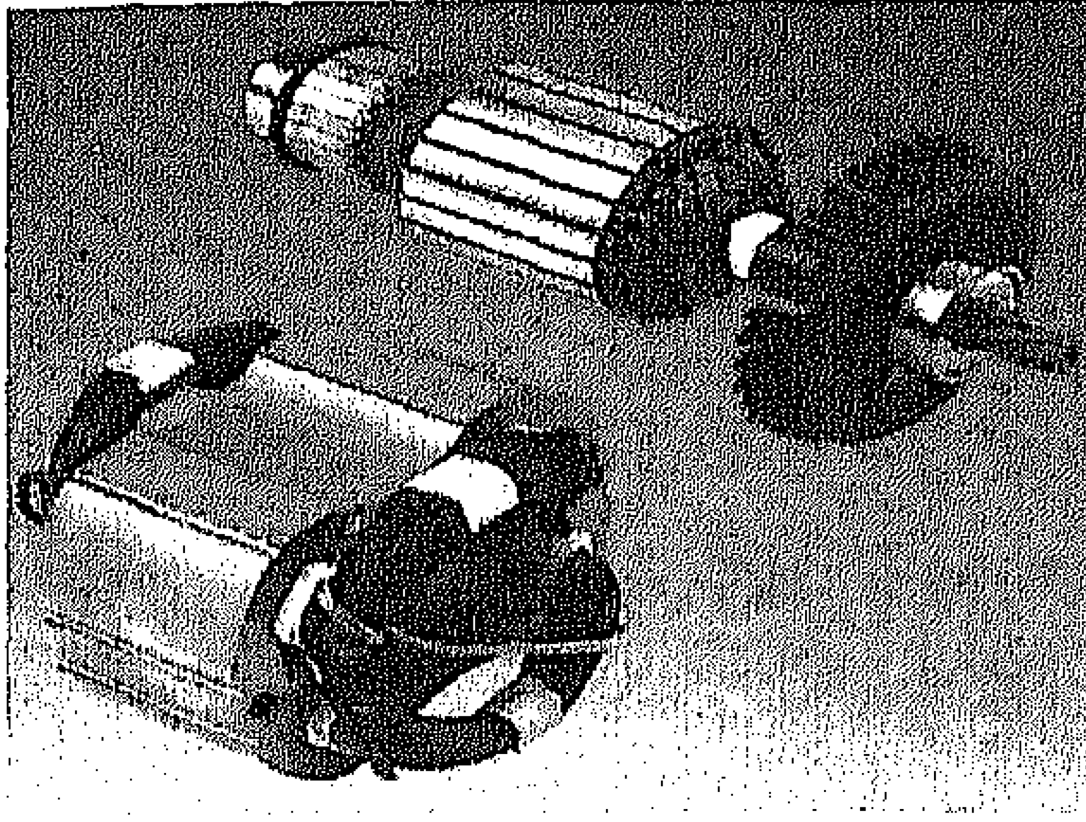
وفي عام 1871م تمكن المهندس الكهربائي البلجيكي زينوب جرامي (Zénobe Gramme) من تصنيع مولد كهربائي مزود بمبدل لتوليد التيار المستمر وبكفاءة مقبوله بحيث بدأ التفكير في استخدام المولدات الكهربائية للأغراض التجارية. ولقد اكتشف جرامي بالصدفة أن مولده الكهربائي هذا يمكن أن يعمل كمحرك كهربائي من خلال تسليط جهد كهربائي بتيار مباشر عليه فانتشر استخدام هذه الآلة كمولد كهربائي وكمحرك كهربائي. ولقد تم استخدام المغناطيس الكهربائي بدلا من المغناطيس الطبيعي في المولدات والمحركات الكهربائية الكبيرة فيما بعد ويعزى الفضل في هذه الفكرة إلى المخترع الهنغاري أنيوس جدلك

(Ányos Jedlik). وبعد اختراع المصباح الكهربائي (electric lamp) على يد رجل الأعمال والمخترع الأمريكي الشهير توماس أديسون (Thomas Alva Edison) في عام 1879م وتأسيسه لشركة لتوليد وتوزيع الكهرباء لأغراض الإنارة في عام 1880م طرأت تحسينات كثيرة على المولدات الكهربائية لرفع كفاءتها. وخلال سنوات قليلة أنشأت شركة أديسون مئات الشبكات في المدن الأمريكية لتزويدهم بالكهرباء ذات التيار المباشر لأغراض الإنارة ولكن كانت هذه الشبكات تعاني من مشكلة كبيرة جدا وهي أن المسافة القصوى لخطوط النقل لا تتجاوز عدة كيلومترات بسبب أن الجهد الكهربائي ينخفض بشكل كبير إلى قيم لا يمكنها تشغيل المصابيح الكهربائية.

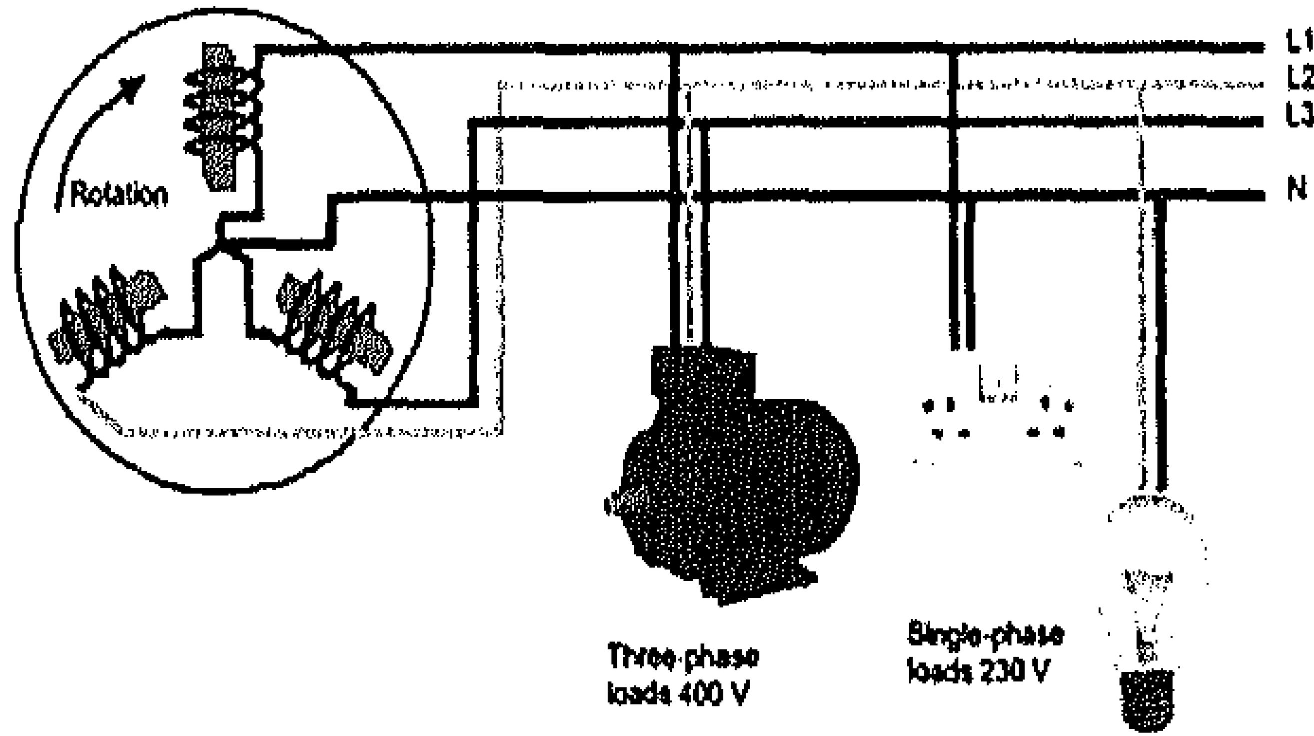
وبعد أن اقترح المهندس الكهربائي المشهور الصربي المولد والأمريكي المنشأ نيكولا تسلا (Nikola Tesla) (1856-1943م) استخدام التيار المتناوب بدلا من التيار المباشر في توليد ونقل الطاقة الكهربائية بدأ الاهتمام بتصنيع مولدات التيار المتناوب والتي تبين أنها أبسط تركيبا من مولدات التيار المباشر لعدم حاجتها للمبدلات المعقدة. وفي غضون سنوات قليلة تمكن المخترعون في أوروبا وأمريكا من تصنيع عدة مولدات عملية لتوليد التيار المتناوب منهم المهندس الإنكليزي سيبستيان فيرناتي (Sebastiani de Ferranti) والمهندس الألماني الشهير إيرنست سيمنز(Earnst Siemens). وفي عام 1886م قام رجل الأعمال والمخترع الأمريكي جورج وستنقهاوس (George Westinghouse) بإنشاء شبكة لتوليد وتوزيع الكهرباء ذات التيار المتناوب وقد تم استخدام المحولات الكهربائية لرفع الجهد الذي يولده المولد من خمسمائة فولت إلى ثلاثة آلاف فولت ونقله لمسافات بعيدة ومن ثم تخفيضه لمائة فولت عند المستهلك لتشغيل المصابيح الكهربائية وبهذا تغلب على مشكلة النقل التي تعاني منها أنظمة التيار المباشر التي تبناها أديسون والتي لا يمكن فيها استخدام المحولات لرفع الجهد. وفي هذه الفترة بدأت منافسة شديدة بين شركتي أديسون ووستنقهاوس وظهر بينهم ما يسمى بحرب التيارات (War of currents) وذلك لإثبات أي النظامين أفضل لتبنيه في أنظمة توليد ونقل الطاقة الكهربائية. وكان النصر بعد عدة سنوات لصالح وستنقهاوس وذلك بفضل المهندس الكهربائي المشهور نيكولا تسلا (Nikola Tesla) والذي تمكن في عام 1883م من اختراع محرك يعمل بالتيار المتناوب كبديل عن محرك التيار المباشر وهو محرك الحث (induction motor). وقد تمكنت شركة وستنقهاوس بمساعدة تسلا واختراعاته الكثيرة والتي قامت بشراء معظمها من بناء أول محطة توليد كهرومائية على شلالات نياغرا في عام 1889م ونقل طاقتها باستخدام نظام النقل متعدد الأطوار (poly phase) لمسافة أربعين كيلومتر إلى مدينة بافالو. وبعد هذا النصر الكبير لوستنقهاوس اضطر أديسون للتحول لأنظمة توليد ونقل التيار المتناوب بعد أن دمج شركته في شركة (General Electric) المعروفة وقد تم اعتماد تردد التيار في هذه الأنظمة ليكون ستين هيرتز في أميركا وخمسين هيرتز في أوروبا. وفي عام 1888م تمكن المهندس الروسي ميخائيل دوبروفولسكي (Mikhail Dolivo-Dobrovolsky) من اختراع المولدات وكذلك المحركات ثلاثية الأطوار.



يقوم عمل المولد الكهربائي على مبدأ بسيط وهو أنه عند تحريك سلك معدني وعادة ما يكون من النحاس في مجال مغناطيسي ثابت فإنه سيتولد عند طرفي السلك قوة دافعة كهربائية تتناسب قيمتها مع سرعة حركة السلك وطوله المعرض للمجال وكذلك شدة المجال المغناطيسي. ويمكن أن نحصل على نفس مقدار القوة الدافعة الكهربائية إذا ما تم تثبيت السلك وتحريك مغناطيس دائم أمامه بنفس السرعة. وبناءا على هذا المبدأ فإن تركيب المولد الكهربائي يأتي على شكلين لا ثالث لهما ففي الشكل الأول يتم لف السلك النحاسي الذي يتولد فيه الجهد على شكل ملفات كهربائية داخل أخاديد محفورة في السطح الداخلي لأسطوانة حديدية ساكنة تسمى العضو الساكن (stator) ووضع عدد من المغناطيسات الطبيعية أو الكهربائية على السطح الخارجي لأسطوانة حديدية تسمى العضو الدوار (rotator) بحيث يكون عدد الملفات مساويا لعدد الأقطاب المغناطيسية أو من مضاعفاتها ويتم وضع الجزء الدوار داخل الاسطوانات الثابتة بعد تثبيته على محاور دوارانه. أما الشكل الثاني فهو على عكس الشكل الأول حيث يتم وضع السلك النحاسي الذي يتولد فيه الجهد في الجزء الدوار والمغناطيسات الدائمة أو الكهربائية في الجزء الساكن. وعند تدوير الجزء الدوار بمحرك ميكانيكي وبسرعة ثابتة فإن مرور المجال المغناطيسي أمام الملفات النحاسية أو العكس سيولد جهدا كهربائيا بين أطراف الملفات طبقا لقانون فارادي المشهور.



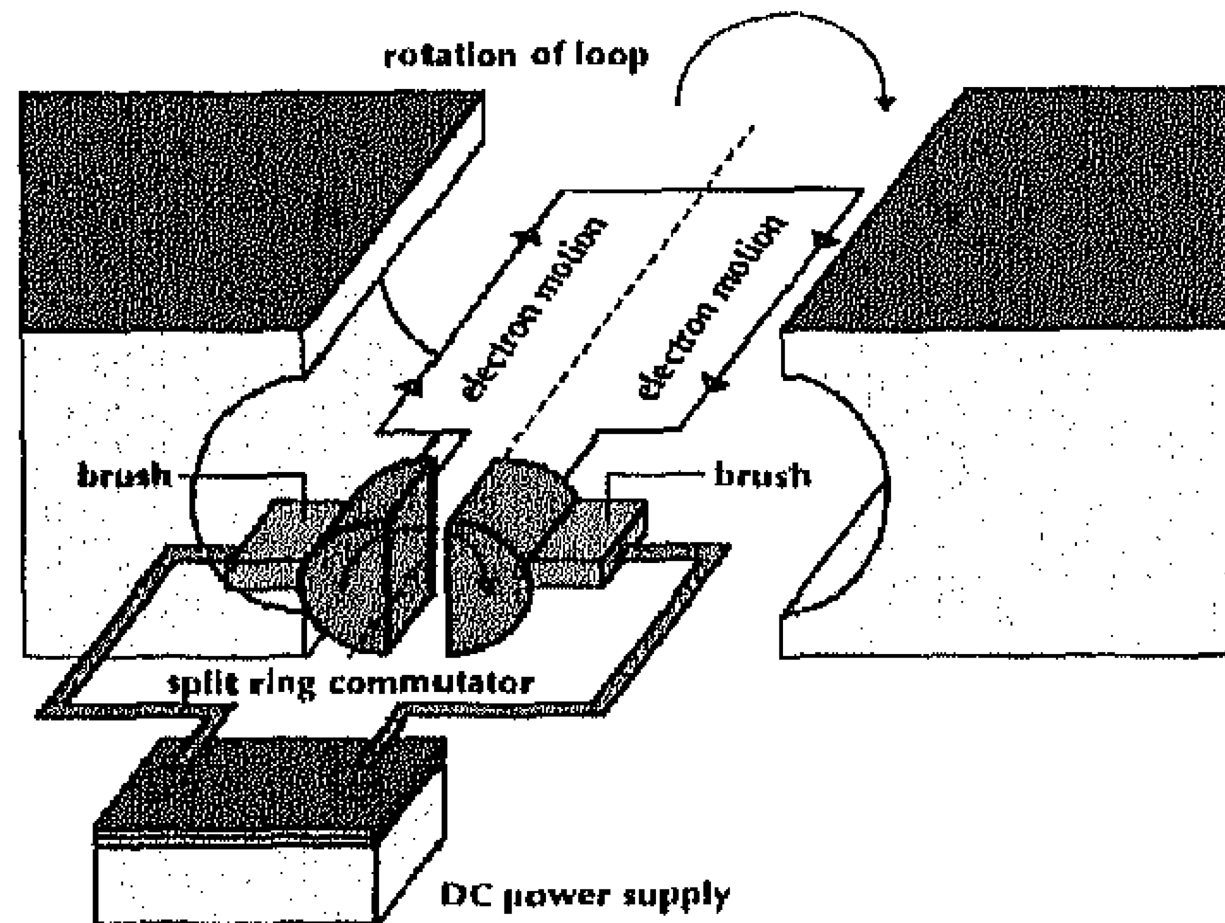
إن الشكل الأول للمولد الكهربائي هو الأسهل في التصميم والأكفأ في الأداء من الشكل الثاني وذلك بسبب وجود الملفات المولدة للطاقة الكهربائية في الجزء الساكن وعليه فمن السهل وضع عدد كبير من هذه الملفات المكونة من أسلاك طويلة لتوليد فرق الجهد المطلوب وذات مقاطع كبيرة لتقليل مقاومتها وبالتالي تقليل كمية الحرارة المتولدة من التيارات الكبيرة التي تحملها وكذلك سهولة تبريدها وسهولة أخذ الطاقة الكهربائية المتولدة منها. ولهذه الأسباب فإن هذا الشكل هو المستخدم بدون استثناء في مولدات التيار المتناوب أما الشكل الثاني فعلى الرغم من صعوبة تصميمة وتدني كفاءته إلا أنه يستخدم في مولدات التيار المباشر وذلك لأن طريقة عمل المبدل الذي يقوم بتحويل التيار المتناوب الذي تولده الملفات إلى تيار مباشر تتطلب وجوده ووجود الملفات على العضو الدوار. وفي الشكل الأول يتم تزويد المغناطيسات الكهربائية الموجودة على العضو الدوار بالتيار المباشر اللازم من خلال حلقات الإنزلاق (slip rings) والفحمات المثبتة عليها. ويوجد نوعين من مولدات التيار المتناوب الدارجة من حيث عدد الأطوار وهي أحادية الطور (single phase) وفيها يتساوى عدد الملفات الكهربائية المثبتة على العضو الساكن مع عدد الأقطاب المغناطيسية المثبتة على العضو الدوار وثلاثية الأطوار (three phase) وفيها يبلغ عدد الملفات الكهربائية المثبتة على العضو الساكن ثلاثة أضعاف عدد الأقطاب المغناطيسية المثبتة على العضو الدوار. ويتم تحديد عدد الأقطاب المغناطيسية في المولدات المتناوبة بناءا على التردد المستخدم والسرعة المراد تدوير العضو الدوار عليها فعلى سبيل المثال فلتوليد جهد بتردد خمسين هيرتز يلزم أن تكون سرعة الدوران 3000 دورة في الدقيقة في حالة القطبين و1500 دورة في الدقيقة في حالة أربعة أقطاب و 1000 دورة في الدقيقة في



حالة ستة أقطاب وهكذا يمكن تقليل سرعة الدوران من خلال زيادة عدد الأقطاب لتتوافق سرعة المولد مع سرعة المحرك الميكانيكي الذي يديره.

3-3 المحركات الكهربائية (Electric Motors)

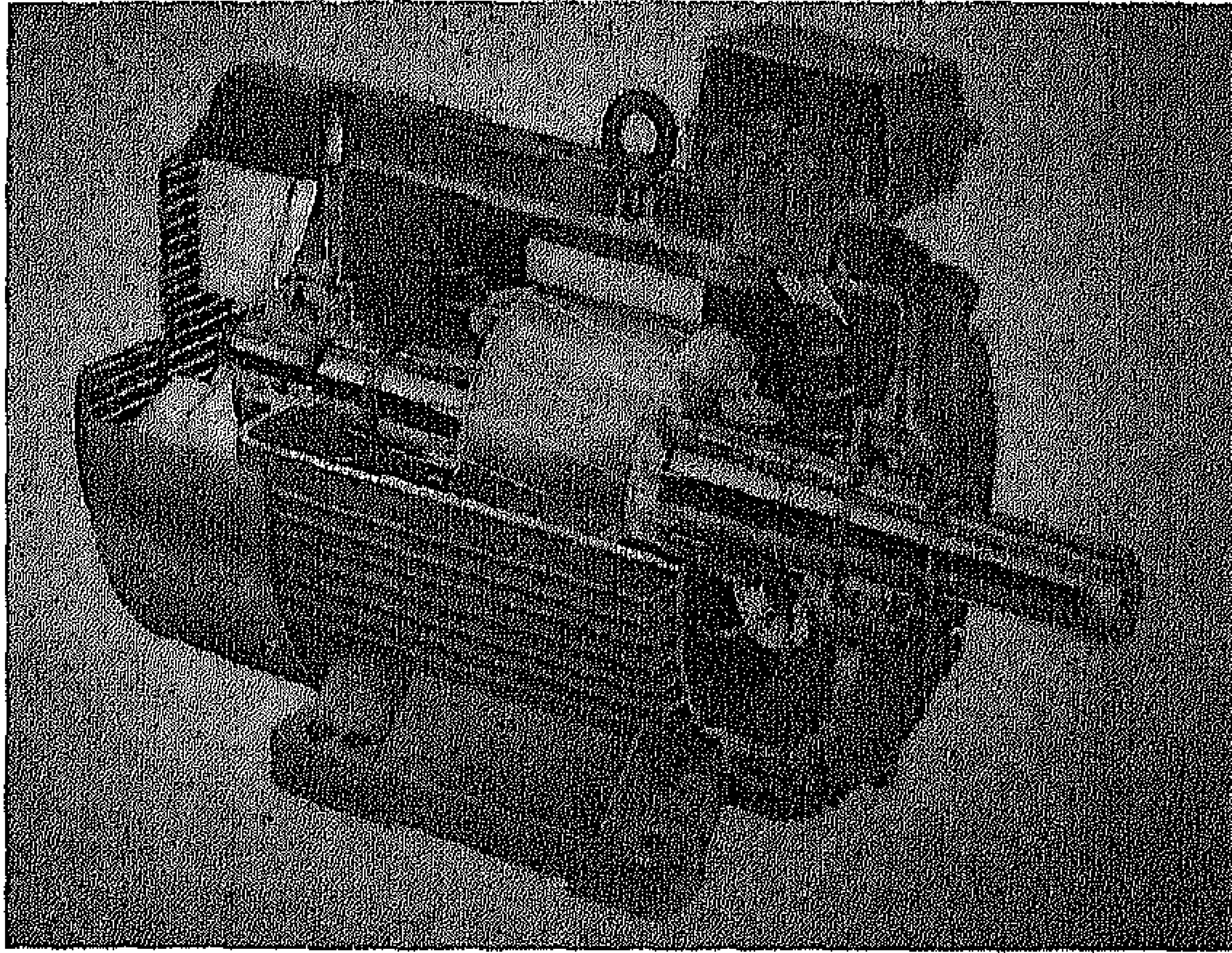
إن من أهم ميزات الطاقة الكهربائية هو سهولة تحويلها إلى مختلف أشكال الطاقة وعلى الوجه الخصوص الطاقة الميكانيكية والتي هي أكثر أشكال الطاقة التي يحتاجها الإنسان لإنجاز أعماله المختلفة. إن الجهاز الذي يقوم بتحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية هو المحرك الكهربائي. لقد أحدثت المحركات الكهربائية ثورة في مختلف مجالات الحياة لا تقل بل تزيد عن الثورة التي أحدثتها المحركات الميكانيكية وخاصة محرك الاحتراق الداخلي (internal combustion engine) وذلك بسبب ميزاته المتعددة بالمقارنة معه. تتميز المحركات الكهربائية بإمكانية تصنيعها بأحجام وقدرات تتراوح من الصغيرة جدا والتي يمكن وضعها في الساعات إلى الكبيرة جدا والتي تستخدم كمحركات في القطارات والسفن والرافعات العملاقة وفي الصناعات بمختلف أنواعها. وتتميز كذلك بإمكانية تصنيعها لتدور بسرعات غاية في التفاوت وكذلك بإمكانية التحكم بسرعة دورانها بدقة عالية جدا مما أدى إلى تجنب استخدام أنظمة التروس المعقدة المستخدمة في المحركات الميكانيكية. وتتميز أيضا بكفاءتها التحويلية العالية التي تزيد في معظم أنواعها عن التسعين بالمائة وهذه الميزة لا تقلل فقط كمية الطاقة الكهربائية المستهلكة بل تقلل من كمية الحرارة المتولدة فيها مما يشجع على وضعها في مختلف أنواع الأجهزة والمصانع دون الخوف من تسببها في إحداث الحرائق. ومن ميزاتها الأخرى طول عمرها التشغيلي وانخفاض ضجيجها وقلة الحاجة لصيانتها وعدم خروج أية عوادم منها.



وقد ظهرت للوجود مع اختراع المحرك الكهربائي أجهزة ومعدات لا حصر لعدد أنواعها وما كان للمهندسين أن يفكروا في اختراع مثل هذه الأجهزة بدون وجود المحرك الكهربائي. ففي المنازل تم استخدام المحرك الكهربائي في الثلاجات والغسالات والمكانس والجلايات والخلاطات والشوايات ومجهزات الطعام فقللت بذلك الجهد البدني الذي كانت تبذله ربات البيوت للقيام بمثل هذه المهمات. وتم كذلك استخدامه في البيوت والمكاتب والمصانع لتوفير الأجواء المناسبة والمريحة داخلها من خلال تشغيل المكيفات والمدفئات والمراوح والشفاطات ومضخات المياه. وبسبب استخدامه كمحرك في المصاعد الكهربائية توجه البشر لبناء البنايات متعددة الطبقات التي وفرت عليهم مساحات واسعة من الأراضي وأصبح بالإمكان بناء ناطحات السحاب التي قد يزيد عدد طوابقها عن المائة وارتفاعها عن الخمسمائة متر. وباستخدام المحرك الكهربائي تم استغلال ما تحت سطح الأرض في المدن الكبرى لإنشاء شبكات كبيرة من الأنفاق الأرضية لنقل الركاب باستخدام القطارات الكهربائية ولو استخدمت محركات الاحتراق الداخلي بدلا منها لاختنق الركاب من استنشاق عوادمها. ونتيجة للتلوث الكبير لأجواء المدن من عوادم السيارات والمركبات التي تسير في شوارعها بأعداد ضخمة فإن الأمل معقود على السيارات الكهربائية للتخلص من هذه المشكلة.

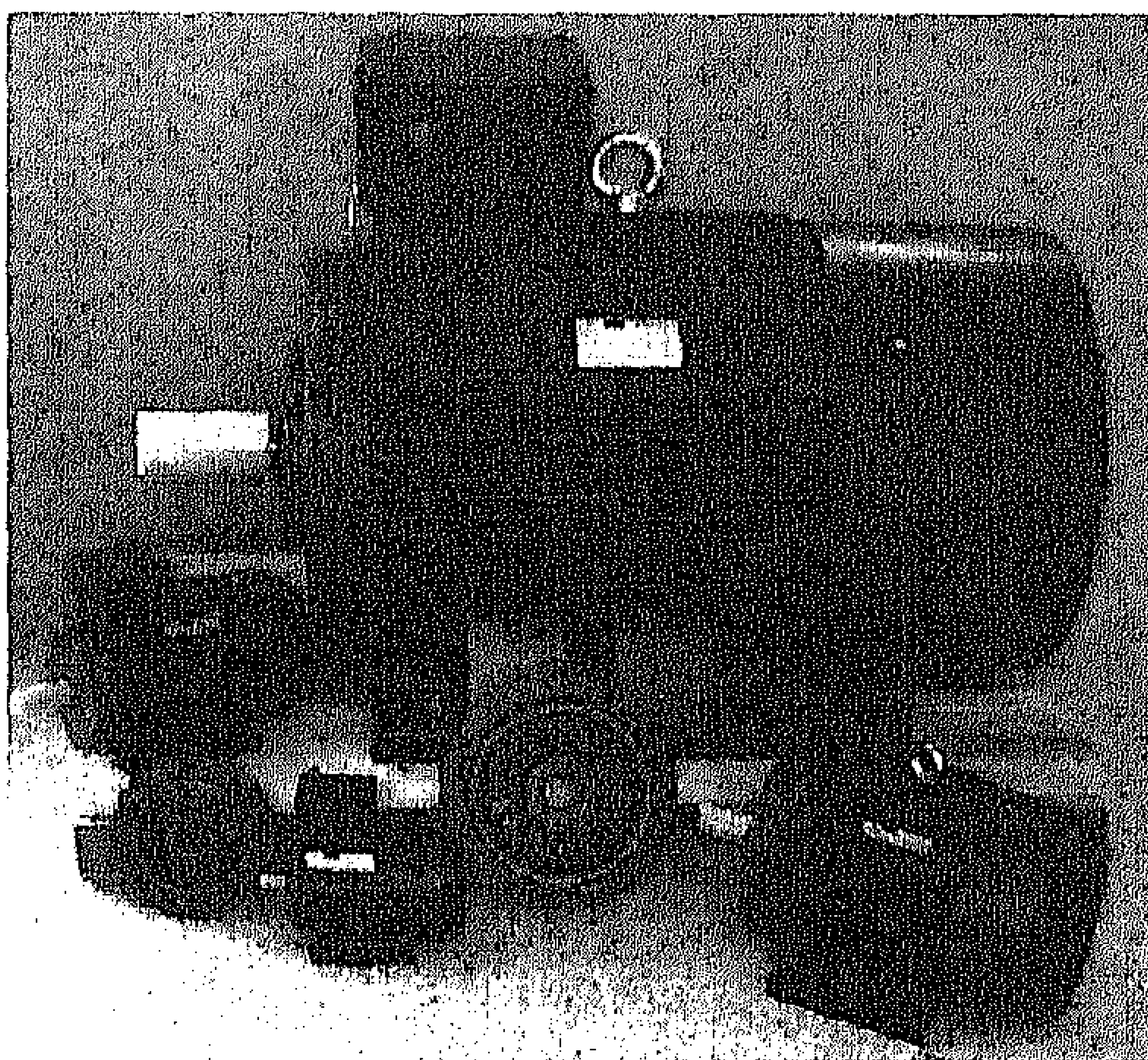
وسيكون المحرك الكهربائي بديلا لمحرك الاحتراق الداخلي في السيارات والمركبات عاجلا أما آجلا وذلك بسبب الارتفاع المضطرد لأسعار المشتقات البترولية نتيجة لتناقص احتياطات البترول في العالم وذلك بسبب كفاءته العالية. ولقد عمل المحرك الكهربائي على تحويل مختلف أنواع المصانع إلى مصانع آلية تعمل على مدار اليوم حيث حلت هذه المحركات الصغيرة محل الإنسان أو المحركات الميكانيكية الكبيرة الحجم فتعددت مهام هذه المصانع وتقلصت أحجامها وزادت كميات إنتاجها. وبفضل المحركات الكهربائية أصبحت السيارات والمركبات أكثر رفاهية حيث تستخدم الأزرار في التحكم بكثير من أجزائها كالأبواب والشبابيك والمرايا والمقاعد والهوائيات وغيرها. وقد تم استخدام المحركات الكهربائية في تشغيل مختلف أنواع الأجهزة والمعدات الحديثة التي ظهرت مع ظهور هذه المحركات كالمسجلات السمعية والمرئية ومحركات أقراص الحواسيب المغناطيسية والضوئية والطابعات بمختلف أنواعها والروبوتات الصناعية والعادية والألعاب.

إن مبدأ عمل المحرك الكهربائي هو على العكس من مبدأ عمل المولد الكهربائي فعند تمرير تيار كهربائي في سلك موجود في مجال مغناطيسي ثابت فإن قوة ميكانيكية ستؤثر على السلك فتدفعه للحركة وبهذا فإنه بالإمكان تحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة حركية. وقد تم إثبات مبدأ عمل المحرك الكهربائي في عام 1821م وذلك على يد الفيزيائي الإنكليزي ميشيل فارادي حيث قام ببناء محرك بسيط وهو عبارة عن سلك نحاسي مدلى ومغموس في وعاء مملوء بالزئبق (يمكن استخدام محلول الملح بدلا من الزئبق) وفي وسط الوعاء يوجد مغناطيس دائم وعند تمرير تيار كهربائي في الدائرة المكونة من السلك والزئبق فإن السلك يبدأ بالدوران حول المغناطيس. وفي عام 1828م تمكن المخترع الهنغاري أنيوس جدلك (Ányos Jedlik) من تصنيع محرك كهربائي أقرب في الشكل للمحركات الحديثة واستخدم فيه المغناطيس الكهربائي بدلا من المغناطيس الدائم. وفي عام 1832م تمكن الفيزيائي الإنكليزي وليم ستيرجن (William Sturgeon) والذي سبق له ان اخترع المغناطيس الكهربائي من تصنيع أول محرك كهربائي عملي مزود بمبدل (commutator). وبسبب عدم توفر طاقة كهربائية كافية لتشغيل مثل هذه المحركات الكهربائية حيث لم يتم تصنيع المولدات الكهربائية بعد فقد قل الاهتمام بتطوير المحركات الكهربائية لفترة طويلة من الزمن. ولقد تجدد الاهتمام بها في عام 1871م بعد أن تمكن المهندس الكهربائي البلجيكي زينوب جرامي (Zénobe Théophile Gramme) من تصنيع مولد كهربائي عملي ولقد اكتشف جرامي بالصدفة في عام 1873م أن مولده الكهربائي الذي يولد التيار المباشر يمكن أن يعمل كمحرك كهربائي من خلال تسليط جهد كهربائي بتيار مباشر عليه فانتشر استخدام هذه الآلة كمولد كهربائي وكمحرك كهربائي. وفي عام 1883م تمكن المهندس الكهربائي الصربي المولد والأمريكي المنشأ نيكولا تسلا (Nikola Tesla) من اختراع محرك يعمل بالتيار المتناوب كبديل عن محرك التيار المباشر وهو محرك الحث (induction motor). وفي عام 1888م أيضا تمكن المهندس الروسي ميخائيل دوبروفولسكي (Mikhail Dolivo-Dobrovolsky) من اختراع المحركات الكهربائية ثلاثية الأطوار (three-phase motors).



لا يختلف تركيب المحرك الكهربائي كثيرا عن تركيب المولد الكهربائي فهو مكون من عضو ساكن (stator) وآخر دوار (rotator) ويتم وضع الملفات التي تولد المجال المغناطيسي وتلك التي يمـــرر فيهـــا التيار في أخاديد محفورة في السطح الداخلي للعضو الساكن وفي السطح الخارجي للعضو الدوار وذلك حسب نوع المحرك. ففي محركات التيار المباشر يتم وضع ملفات المغناطيس الكهربائي أو المغناطيسات الدائمة في العضو الساكن بينما توضع الملفات الحاملة للتيار في العضو الدوار ويتم تغذية ملفات العضو الدوار من خلال مبدل وفراشي فحمية مثبتة عليه. وتتميز محركات التيار المباشر بسهولة التحكم بسرعتها على مدى واسع من السرعات وذلك من خلال التحكم بالتيار المار في ملفات المغناطيس الكهربائي ولذلك تستخدم في التطبيقـــات التي تحتاج لسرعات متغيرة. وتتميز كذلك بسهولة تدويرها في الاتجاهين وقوة عزمها وسهولة المقايضة بين السرعة والعزم من خلال اختيار طريقة توصيل ملفات المجال. ومن سيئاتها تعقيد تركيبها وحاجة المبـدلات والفراشي الفحمية للصيانة المتكررة وكذلك التشويش على الأجهزة الكهربائية من حولها بسـبب الشـرارات الكهربائية التي يطلقها المبدل والفحمات.

أما محركات التيار المتناوب فهي على العكس من ذلك حيث يتم وضع الملفـات الحاملـة للتيـار المتناوب في العضو الساكن بينما يتم وضع ملفات المغناطيس الكهربائي أو المغناطيسات الدائمة في العضـو الدوار ويتم تغذية ملفات العضو الدوار من خلال حلقات الإنزلاق والفراشي الكربونية. وتنقسم محركات التيار المتناوب إلى نوعين رئيسين وهما المحركـات المتزامنـة (synchronous motors) ومحركـات الحـث (induction motors) وكلاهما يحتاج لكي يدور إلى ما يسمى بالمجـال المغناطيسـي الـدوار (rotating magnetic field) كما اكتشف ذلك تسلا في عام 1883م. ويمكن الحصول على مجال مغناطيسي دوار مـن خلال مجموعتين أو أكثر من الملفات المثبتة على العضو الساكن يتم تغذيتها بتيارات ذات أطـوار مختلفـة.



وفي المحركات المتزامنة يوجـد علـى العضـو الدوار ملفات يتم تغذيتها بالتيار المباشر من خلال حلقات الإنزلاق والفراشـي الكربونيـة لتوليـد مغناطيسات كهربائية بعدد أقطاب يماثـل عـدد الملفات في العضو الساكن. ولا يمكن للمحركات المتزامنة أن تبدأ الدوران من تلقاء نفسـها بـل تحتاج إلى محرك خارجي لتدويرها وما أن تصل سرعة دورانها إلى سـرعة الـدوران التزامنيـة (synchronous speed) فإنهـا تبقـى تـدور بسرعة ثابتة بغض النظر عن الحمـل المسـلط عليها وذلك ضمن حدود قدرة المحرك.

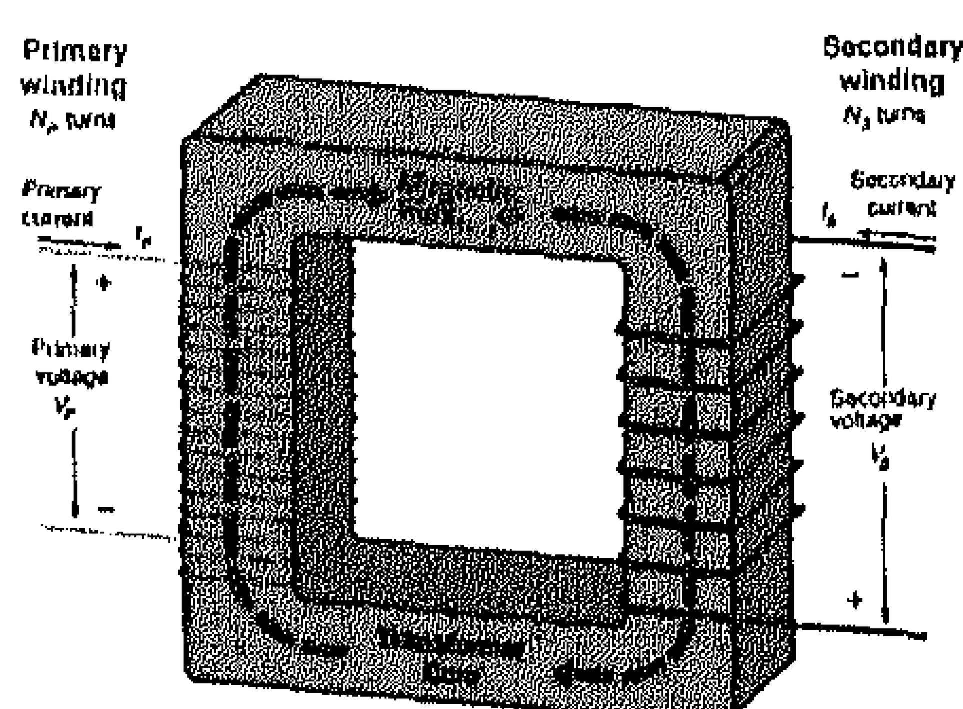
أما محركات الحث فإن العضو الدوار يحتوي على ملفات مغلقة لا تغـذى بـأي تيـار كهربـائي وبمجرد تسليط التيارات المتناوبة على ملفات العضو الساكن وتولد المجال المغناطيسي الدوار فيه فإن مجـالا مغناطيسيا دوارا آخر سيتولد بالحث في ملفات العضو الدوار وعند تفاعل المجالين الدوارين في العضـوين يبدأ العضو الدوار بالدوران بسرعة تساوي سرعة دوران المجال المغناطيسـي الـدوار للعضـو السـاكن. ولتخفيض كلفة محرك الحث يتم في العادة استبدال ملفات العضو الدوار المغلقة بقضبان نحاسية بمقاطع كبيرة توضع بدون عزل في أخاديد على سطح العضو الدوار ويتم وصل أطراف هذه القضبان بحلقتـين نحاسـيتين

مثبتتين عند طرفي جسم العضو الدوار ليكون شكل القضبان مع الحلقتين على شكل قفص السنجاب (squirrel cage). وعلى العكس من المحرك المتزامن فإن سرعة دوران محرك الحث يمكن أن تقل عن سرعة التزامن كلما زاد الحمل المسلط عليه. إن المجالات الدوارة لا تتولد كما ذكرنا آنفا إلا بواسطة ملفين أو أكثر يحملان تيارات بأطوار مختلفة ولهذا فإن الأصل أن محركات الحث لا تعمل إلا من خلال مصادر تيار متناوب ثنائية أو ثلاثية الأطوار ولكن من خلال تعديلات بسيطة في تركيب المحرك يمكن تصنيع محركات حث تعمل على مصادر أحادية الطور. وفي هذه الحالة يلزم لتوليد مجال مغناطيسي دوار من مصدر أحادي الطور وجود ملف آخر مع الملف الرئيسي على العضو الساكن ومن خلال وصل مكثف على التوالي مع الملف الثانوي فإن طور التيار في الملف الثانوي سيكون مختلف عن ذلك الذي في الملف الرئيسي رغم أن الجهد المسلط عليهما واحد ويسمى هذا النوع من محركات الحث أحادية الطور بمحرك الحث منشطر الطور (split-phase induction motor). وغالبا ما يتم فصل الملف الثانوي بمجرد دوران المحرك وذلك بواسطة مفتاح ميكانيكي يعمل بالطرد المركزي وذلك لتوفير الطاقة.

تتميز محركات التيار المتناوب وخاصة محركات الحث بسهولة تركيبها ورخص أثمانها بالمقارنة مع محركات التيار المباشر إلا أن عيبها الأكبر هو صعوبة التحكم في سرعة دورانها في التطبيقات التي تحتاج لمثل هذا التحكم. تتحدد سرعة دوران هذه المحركات من تردد مصدر التيار المتناوب الذي يغذيها وعدد الأقطاب المغناطيسية حيث تتناسب طرديا مع التردد وعكسيا مع عدد الأقطاب وهي ثابتة تماما في المحركات المتزامنة وتقل قليلا عن سرعة التزامن في محركات الحث وذلك حسب الحمل الذي يديره المحرك. ويوجد عدة آليات للتغلب عل مشكلة التحكم في سرعة هذه المحركات منها استخدام مصدر تغذية بتردد يمكن التحكم به وبالتالي التحكم بسرعة المحرك ويتم الحصول على مصدر تيار بتردد متغير من مصدر تيار بتردد ثابت من خلال استخدام أجهزة إلكترونية تسمى محولات التردد (variable-frequency drive). وإلى جانب هذه الأنواع الرئيسية من المحركات يوجد أنواع خاصة من المحركات تصمم لتلبي حاجة بعض التطبيقات ومن أهمها ما يسمى بالمحركات الخطوية (stepper motors) والتي يمكن من خلالها تحريك العضو الدوار بشكل متقطع وعلى شكل خطوات أو قفزات تكون فيها الخطوة أقل بكثير من الدورة الكاملة . ويتكون المحرك الخطوي من عضو ساكن بعدد معين من الملفات ومن عضو متحرك قد يحتوي على عدد من المغناطيسات الدائمة أو بقلب حديدي مسنن بدون مغناطيسات ويمكن تحريك المحرك على شكل خطوات من خلال تغذية ملفات العضو الساكم بنبضات كهربائية بترتيب معين بحيث يغذى ملف واحد فقط من هذه الملفات في الوقت الواحد وغالبا ما يتم هذا من خلال المتحكمات الرقمية والحواسيب. وتستخدم مثل هذه المحركات في معظم خطوط الإنتاج في المصانع وفي مشغلات الأقراص في الحواسيب والرادارات وأنظمة التوجيه وغيرها الكثير.

3-4 المحولات الكهربائية (Electric Transformers)

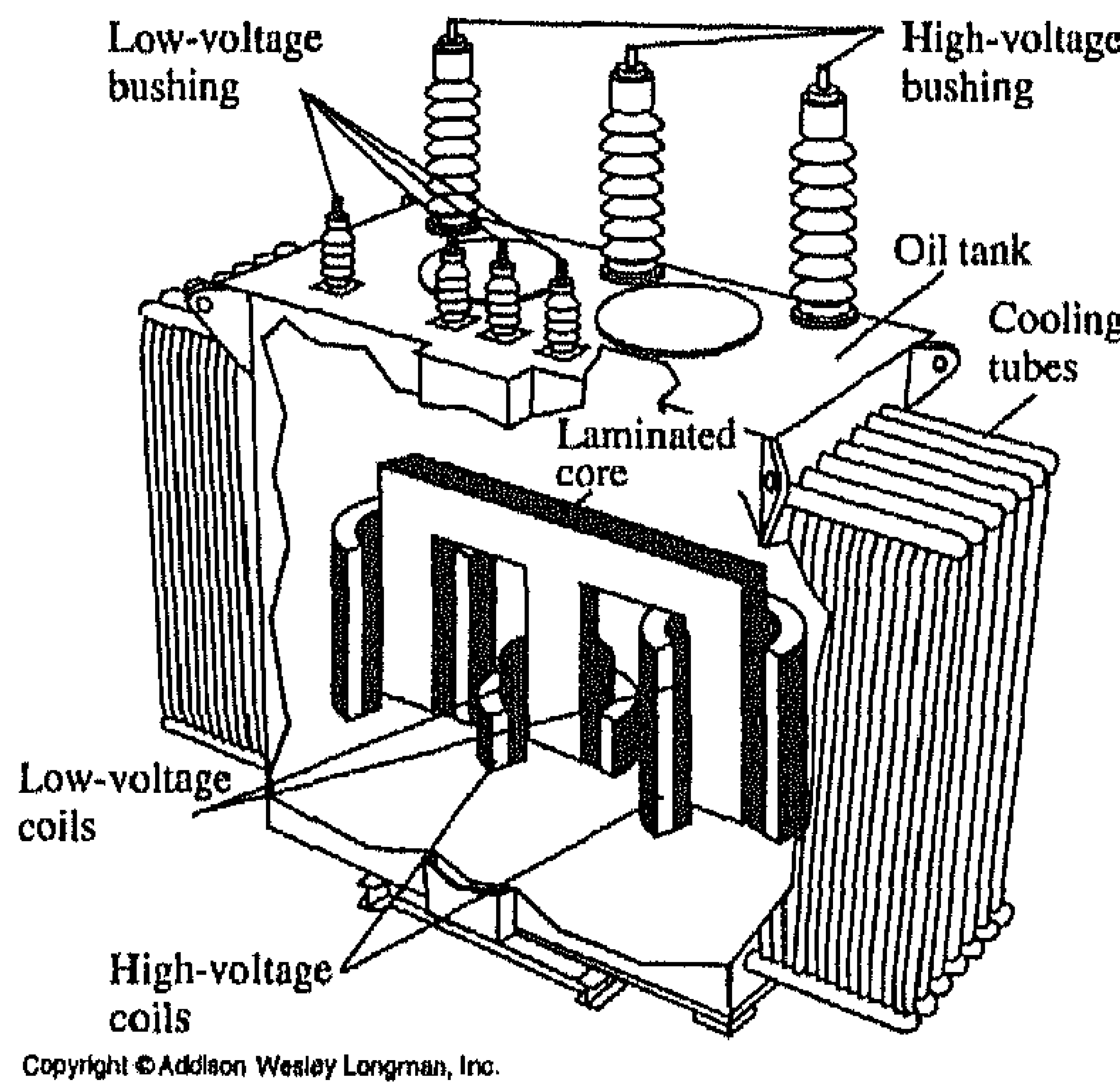
المحول الكهربائي هو جهاز يقوم بنقل الطاقة الكهربائية من دائرة كهربائية إلى دائرة كهربائية أخرى تكونان في الغالب مفصولتان عن بعضهما كهربائيا حيث تتم عملية نقل الطاقة من خلال المجال المغناطيسي الذي يربط



بينهما. إن مبدأ عمل المحول الكهربائي يعتمد على قانون فارادي فالتيار المتغير في الدائرة الكهربائية الأولى عند تمريره في ملف كهربائي ينتج حوله مجالا مغناطيسيا متغييرا وإذا ما قطعت خطوط هذا المجال ملف آخر في دائرة كهربائية أخرى فإن قوة دافعة كهربائية سستتولد فيها طبقا لقانون فارادي. ولكي نضمن أن جميع خطوط المجال المغناطيسي الذي ينتجه ملف الدائرة الأولى أو الملف الإبتدائي ستقطع ملف الدائرة الثانية أو الملف الثانوي فإنه يلزم لف كلا الملفين على قلب حديدي مشترك وذلك لقدرته على حصر جميع خطوط المجال في داخله بسبب نفاذيته المغناطيسية العالية.

لقد استخدم فارادي في عام 1831م شكل مبسط للمحول الكهربائي لإثبات قانون الحث الكهرومغناطيسي الذي اكتشفه ولكنه لم يهتم بتطويره وذلك بسبب أن مجالات استخداماته لم تتضح بعد. وفي عام 1836م اخترع العالم الإيرلندي (Nicholas Callan) ما يسمى بملف الحث (Induction Coil) بعد أن اكتشف أحد أهم قوانين المحول وهو أن نسبة الجهد المتولد في الملف الثانوي إلى الجهد المسلط على الملف الإبتدائي يساوي نسبة عدد لفات الملف الثانوي إلى عدد لفات الملف الثانوي وهذا يعني إمكانية الحصول على جهد عالي جدا من جهد منخفض من خلال زيادة نسبة عدد اللفات. ولذا فقد تم استخدام ملف الحث للحصول على جهود كهربائية عالية جدا لأغراض مختلفة كان أهمها توليد الشرارات الكهربائية لإشعال الغازات القابلة للإشتعال وفي بعض أنواع المصابيح الكهربائية وفي أنظمة إشعال المركبات وفي توليد الموجات الراديوية قبل اختراع الصمام الإلكتروني. وبما أن المحول الكهربائي لا يعمل إلا بالتيارات المتغيرة ولا يعمل أبدا بالتيارات الثابتة وبسبب غياب مصادر التيار المتغير في تلك الفترة فقد تم اللجوء إلى فتح وإغلاق دائرة الملف الإبتدائي بطريقة ميكانيكية لتحويل تيار البطارية إلى تيار متغيير. وفي عام 1881م تمكن الفرنسي لوسين جولارد (Lucien Gaulard) والبريطاني جون جبس (John Dixon Gibbs) من بناء محولات بقلب حديدي مفتوح لأغراض رفع وخفض الجهد في أنظمة التيار المتناوب التي بدأت بالظهور بعد اختراع مولدات التيار المتناوب.

وقد قام عدد كبير من المهندسين في أميركا وأوروبا أمثال تسلا وستانلي بإجراء تحسينات كثيرة على هذا المحول وذلك لاستخدامه في أنظمة توليد ونقل الطاقة الكهربائية باستخدام التيار المتناوب كاستخدام القلوب الحديدية المغلقة والشرائح الحديدية المعزولة (laminated iron core) لبناء القلب وذلك لتقليل تأثير التيارات الدوامة (eddy currents). وكان للمحول الدور الأكبر في حسم حرب التيارات لصالح التيار المتناوب بدلا من التيار المباشر في أنظمة توليد ونقل الطاقة الكهربائية. وفي عام 1889م تمكن المهندس الروسي ميخائيل دوبروفولسكي (Mikhail Dolivo-Dobrovolsky) من اختراع المحول ثلاثي الأطوار وهو أول من اقترح الطريقتين التي



يتم بها توصيل الملفات الثلاثة في المولدات والمحركات والمحولات ثلاثية الأطوار وهما توصيلة المثلث (delta connection) وتوصيلة النجمة (star connection).

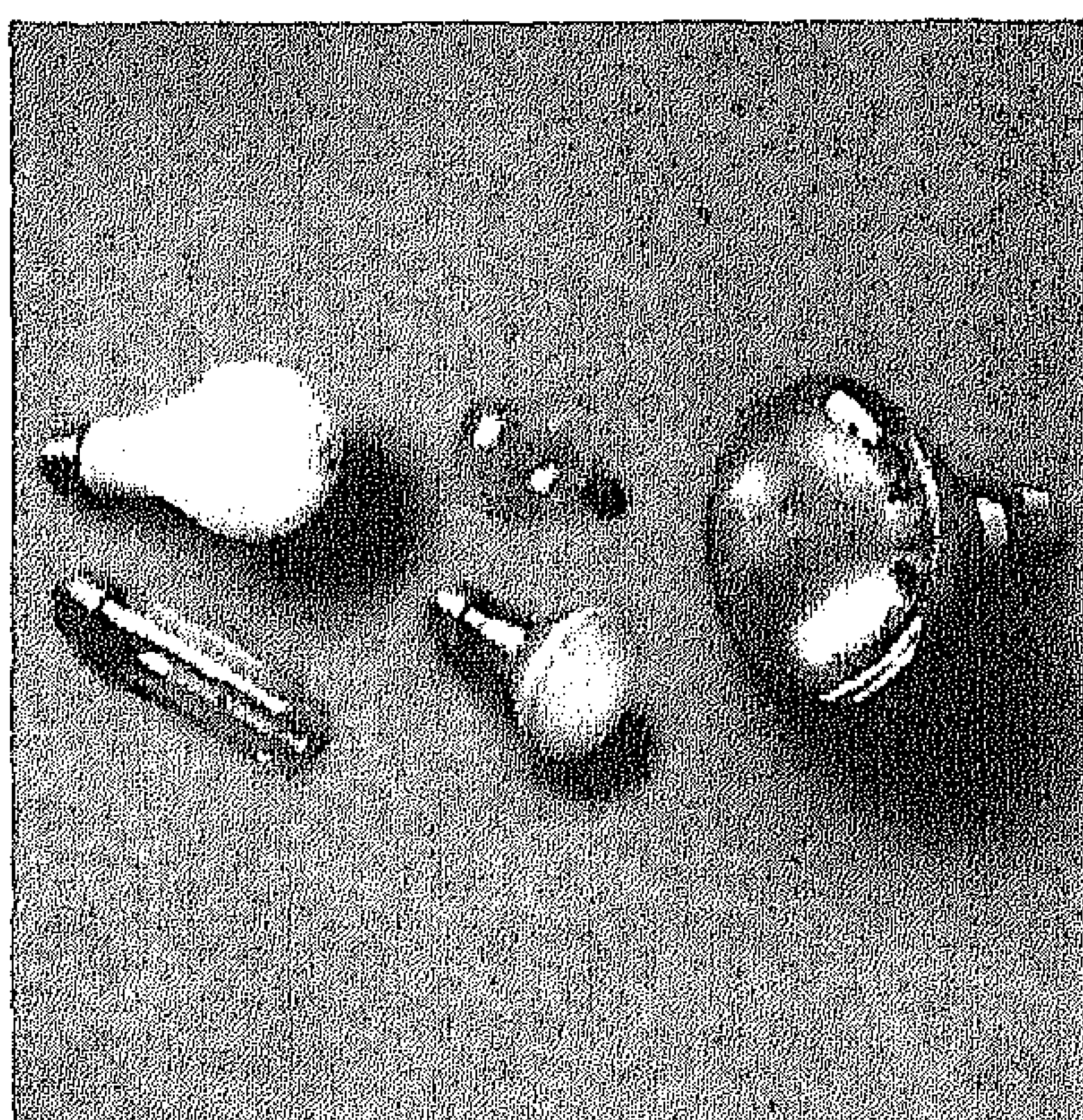
تبنى المحولات الحديثة وخاصة المستخدمة في أنظمة نقل الطاقة الكهربائية من قلوب حديدية (iron core) مغلقة وغالبا ما يستخدم فولاذ السيلكون (silicon steel) أو ما يطلق عليه الفولاذ الكهربائي وذلك لكثرة استخدامه في قلوب المولدات والمحركات والمحولات. ويتميز الفولاذ الكهربائي بمقاومته الكهربائية العالية والتي تعمل على تقليل الفقد الناتج عن التيارات الدوامة وكذلك بصغر مساحة عروة التخلفية المغناطيسية (hysteresis loop) مما يقلل من الفقد الناتج عن هذه الظاهرة. وعادة ما يتم لف الملفين الإبتدائي والثانوي على نفس الذراع لضمان أي تسرب لخطوط المجال المغناطيسي خارج الملف الثانوي. وتتحدد مساحة مقطع القلب الحديدي وبالتالي حجمه من مقدار القدرة الكهربائية التي يتعامل معها المحول ويجب أن يتم اختيار مساحة المقطع بحيث لا تصل كثافة الفيض المغناطيسي إلى حد التشبع (saturation). ويستخدم عند تحديد مساحة المقطع المعادلة العامة للمحول والتي تنص على أن القوة الدافعة الكهربائية الذي يولدها الملف للإشارات الجيبية تتناسب طرديا مع حاصل ضرب التردد ومساحة المقطع وعدد اللفات وكثافة الفيض المغناطيسي ويبلغ ثابت التناسب 4.44. ومن الواضح من هذه المعادلة أن حجم المحول المصمم لنفس مقدار القدرة يمكن تقليله من خلال زيادة التردد ولهذا السبب فإن المحولات المستخدمة في الطائرات تعمل على ترددات تصل لعدة مئات من الهيرتز وليس على 50 أو 60 هيرتز وذلك للتخفيف من وزن الطائرة. واستنادا لقانون حفظ الطاقة فإن القدرة التي يسحبها الملف الإبتدائي من مصدر الطاقة تساوي القدرة التي يسلمها الملف الثانوي للحمل (Load) الموصول عليه هذا على افتراض محول مثالي لا فقد فيه. وبما أن القدرة تتناسب مع حاصل ضرب الجهد في التيار فإن أي رفع في الجهد الثانوي بالنسبة للجهد الإبتدائي سيقابله خفض بنفس نسبة الرفع للتيار الثانوي مقابل التيار الإبتدائي. وفي المحولات الحقيقية فإن جزءا من الطاقة سيضيع كحرارة في جسم المحول وذلك نتيجة لعدد من أنواع الفقد أهمها الفقد في أسلاك الملفات نتيجة مرور التيار فيها والفقد الناتج عن التيارات الدوامة التي تتولد في قلب المحول الحديدي. وإذا ما تم تصميم المحولات بشكل جيد فإن هذا الفقد لا يتجاوز واحد بالمائة من القدرة الكلية إلا أن هذه النسبة المتدنية للفقد تعتبر معضلة كبيرة للمهندسين خاصة في المحولات الكبيرة حيث يلزم التخلص من الحرارة المتولدة وإلا أدت لاحتراق المحولات ولذا يستخدم انواع مختلفة من طرق التبريد في هذه المحولات كالتبريد بالزيت.



تعتبر المحولات الكهربائية من أكثر الأجهزة الكهربائية استخداما فلا يكاد يخلو جهاز كهربائي منها وتستخدم في تطبيقات لا حصر لها وتتراوح أحجامها من تلك التي بحجم حبة الحمص كما في أجهزة استقبال الراديو والتلفزيون وتلك التي تزن مئات الأطنان كما في محطات تحويل الطاقة الكهربائية . ففي أنظمة نقل الطاقة الكهربائية تستخدم المحولات لرفع وخفض الجهد الكهربائي لجهود تتراوح بين عدة عشرات من

الفولتات إلى ما يقرب من مليون فولت وبأحجام تعتمد على مقدار القدرة الكهربائية التي تعالجها والتي قد تصل إلى مئات الميغاواط . وفي أجهزة الاتصالات تستخدم المحولات لموائمة الدوائر الكهربائية والإلكترونية وكذلك خطوط النقل ذات المعاوقات المختلفة عند وصلها ببعضها البعض لضمان إنسياب الإشارات بينها بشكل جيد. وتستخدم المحولات في مضخمات القدرة (power amplifiers) للحصول على كفاءات قدرة عالية بأقل كلفة كما في تلك المستخدمة في السماعات ومحطات البث الراديوية والتلفزيونية والرادارات. وتستخدم المحولات في أجهزة تحويل التيار المتناوب إلى التيار المباشر (AC/DC converters) وأجهزة تحويل التيار المباشر إلى التيار المتناوب (DC/AC inverters). وتستخدم كذلك في أنواع كثيرة من المصابيح الكهربائية كمصابيح التفريغ الغازية لبدء عملية التفريغ الكهربائي فيها وفي معدات اللحام الكهربائية لإنتاج تيارات عالية في الملف الثانوي وفي أجهزة قياس التيار والجهد وفي كثير من الأجهزة والمعدات في المختبرات ومراكز الأبحاث.

5-3 المصابيح الكهربائية (Electric lamps)

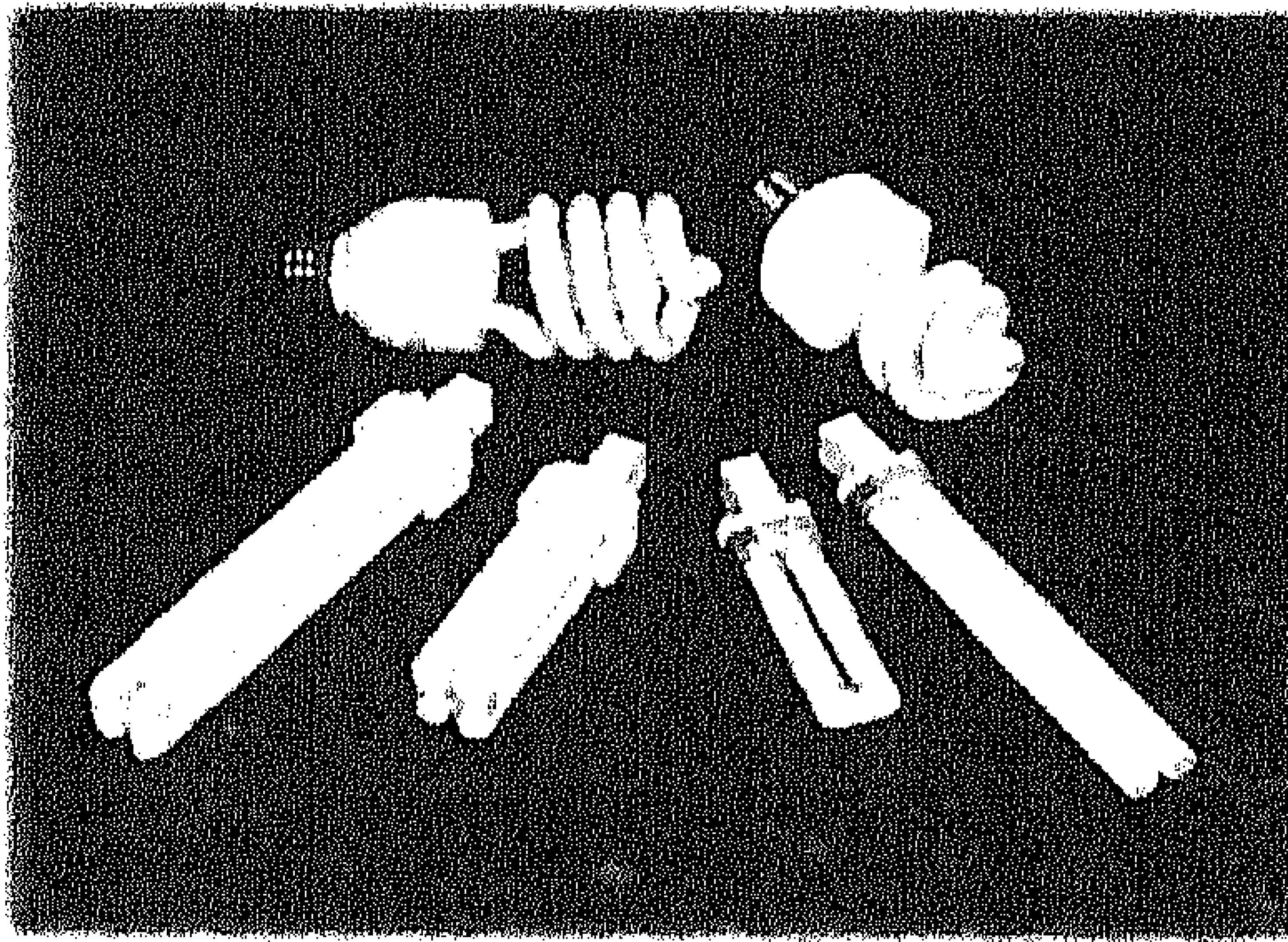


يعتبر اختراع المصباح الكهربائي من أهم الاختراع في تاريخ البشر وأكثرها فائدة لهم فقد حولت هذه المصابيح ليلهم إلى نهار في داخل البيوت والمكاتب والمصانع والشوارع ويتم إضاءتها من خلال كبسة زر في أقل من ثانية. لقد أراحت المصابيح الكهربائية البشر من عناء عمليات تجهيز وإشعال وإطفاء مصابيح الشمع أو الزيت أو الكاز أو الغاز والتي لا تضيء إلا أماكن محددة وبدرجات إضاءة متدنية مع ما يترتب على إشعال هذه المصابيح من تلوث لأجواء البيوت أو خطر احتراق أثاثها. وللقارئ أن يتخيل مدى الجهد الذي ستبذله ربات البيوت في تجهيز عدد كاف من مصابيح الكاز أو الغاز لوضعها في مرافق بيت يتكون من عدة غرف وما يتبعها من غرف الضيوف والجلوس والمطبخ والحمامات. لقد بدأت المحاولات لتصنيع المصابيح الكهربائية مع اختراع مصادر توليد الكهرباء وهي البطارية والمولد الكهربائي في بداية القرن التاسع عشر. وكانت الفكرة الأساسية البسيطة التي حاول المخترعون بناء مصباح كهربائي عليها هي أنه إذا ما تم تمرير تيار كهربائي بقيمة عالية في سلك معدني رفيع جدا فإن الحرارة التي ستتولد فيه سترفع من درجة حرارته وستجعله يتوهج وينبعث منه الضوء إذا ما وصلت درجة حرارته إلى حد معين قد يصل إلى ثلاثة آلاف درجة مئوية. إن تنفيذ هذه الفكرة البسيطة ليست بالأمر السهل في غياب تقنيات التصنيع المناسبة ولذلك باءت كثير من هذه المحاولات بالفشل. إن عملية تصنيع مصباح كهربائي عملي يحتاج إلى شعيرات مصنوعة من معادن يمكن أن تصل حرارتها إلى درجة التوهج دون أن تذوب وكذلك يجب وضع الشعيرات في حيز مفرغ من الهواء أو يحتوي على غاز خامل لكي لا تحترق هذه الشعيرات بوجود الأكسجين.

وفي عام 1879م قام كل من المخترع الأمريكي ثوماس أديسون (Thomas Alva Edison) والفيزيائي الإنكليزي جوزيف سوان (Joseph Swan) كلا على حدا بتسجيل براءة اختراع لمصباح كهربائي

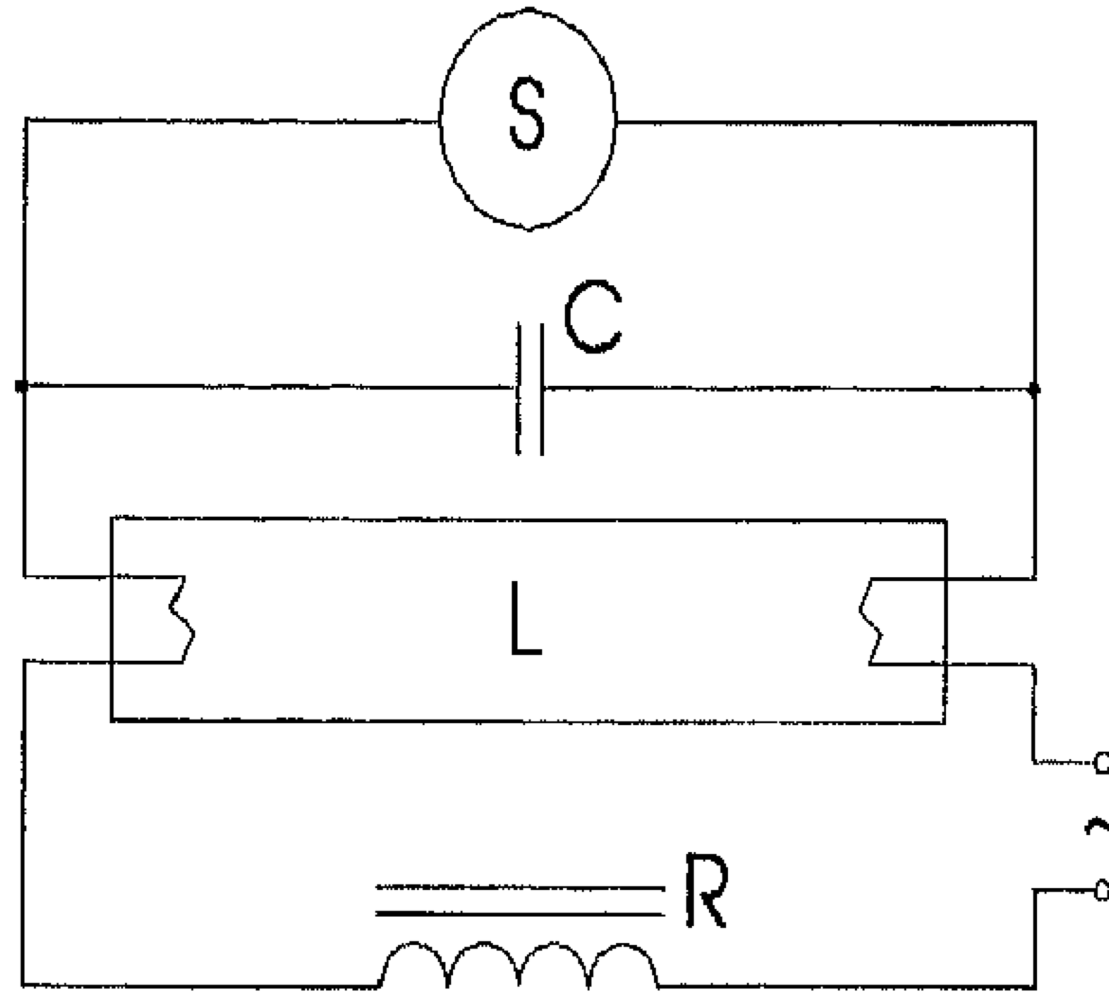
من النوع المسمى لمبة الضوء المتوهج (incandescent light bulb). وقد استخدم أديسون شعيرات من الكربون في المصابيح الأولى التي قام بتصنيعها وكانت اللمبات التي استخدمها مفرغة من الهواء وقد تم استخدام هذه اللمبات في عام 1880م لإضاءة البيوت والشوارع. وقد قام كثير من المخترعين بإجراء تحسينات على لمبة أديسون منها استخدام بعض أنواع المعادن بدلا من الكربون فقد تم استخدام معدن التنغستون (tungsten) في عام 1911م ولازال هو المستخدم حتى الآن. وقد تم أيضا استخدام الغازات الخاملة كالنيتروجين والآرغون لملئ اللمبات الزجاجية بدلا من الفراغ بعد أن وجد أنها تزيد من شدة الإضاءة. وفي عام 1957م تم اختراع لمبات الهيلوجين وهي لا تختلف في مبدأ عملها عن اللمبات المتوهجة العادية فهي تعطي إضاءتها من خلال تسخين شعيرات التنغستون بالتيار الكهربائي ولكنه يتم إضافة عناصر هيلوجينية كاليود والبروم مع الغاز الخامل والتي تتفاعل مع ذرات التنغستون المتبخرة وتحول دون ترسبها على الجدار الزجاجي فيمنع إسودادها وحجبها للضوء المنبعث منها. وعادة ما يتم تصنيع لمبات الهيلوجين بأحجام صغيرة وباستخدام الكوارتز بدلا من الزجاج المستخدم في اللمبات العادية ويعمل هذا التصميم على رفع درجة حرارة اللمبة بشكل كبير مما يساعد على زيادة تفاعل الهيلوجين مع التنغستون المتبخر وكذلك زيادة كفاءة تحويل الطاقة الكهربائية إلى ضوء والتي قد تصل إلى ضعف اللمبات العادية. وتستخدم لمبات الهيلوجين في أجهزة العرض السينمائية والكشافات الضوئية المختلفة وفي أضوية المركبات.

أما مصباح التفريغ الغازي (gas discharge lamp) فقد بدأ التفكير في اختراعه بعد أن قام الفيزيائي الألماني جوهان قيسلر (Johann Geissler) في عام 1856م باختراع مضخة التفريغ الزئبقية وتصنيعه للأنابيب الزجاجية المفرغة من الهواء والتي لعبت دورا كبيرا في اختراع كثير من الأجهزة المهمة كأنبوب الأشعة المهبطية (cathode ray tube) وأنابيب الأشعة السينية (X-ray tube) وكذلك مصابيح الفلورسنت. وقد جرت محاولات كثيرة لتصنيع مصباح كهربائي باستخدام أنابيب قيسلر المفرغة من الهواء أو التي تحتوي على بعض الغازات تحت ضغط منخفض وذلك بعد أن لاحظوا وجود توهج ضوئي عند القطب السالب للأنبوب. لقد تمت أول محاولة ناجحة لتصنيع مصباح تفريغ غازي على يد المهندس الكهربائي دانيال مور (Daniel Moore) في عام 1895م حيث استخدم غاز ثاني أكسيد الكربون وكذلك النيتروجين في هذه الأنابيب والتي كانت بالغة الطول وتحتاج لجهد عالي لتشغيلها. وفي عام 1901 تمكن المهندس الكهربائي الأمريكي بيتر هيويت (Peter Cooper Hewitt) من تصنيع مصباح تفريغ باستخدام بخار الزئبق وكانت أنابيبه ذات أطوال قصيرة وتعمل عند جهد منخفض نسبيا إلا أن الضوء المنبعث يميل للون الأزرق المخضر غير المريح للعين. وفي عام 1909م تمكن المهندس الفرنسي جورج كلاود (Georges Claude) من تصنيع مصباح تفريغ باستخدام غاز النيون (Neon) والذي لاحظ أنه يعطي ضوءا أحمر عند تفريغ تيار كهربائي من خلاله. وقد تم إجراء كثير من التحسينات على مصباح النيون من قبل كثير من المخترعين ليعطي الضوء الأبيض المريح للعين والذي تم من خلال طلاء باطن الأنبوب بمواد مستشعة (flourescent) كالفوسفور والفلورايت. يعتمد مبدأ عمل



جميع أنواع مصابيح التفريغ الكهربائي على إحداث تفريغ كهربائي بين قطبين كهربائيين مثبتين عند طرفي أنبوبة زجاجية مملوءة تحت ضغط منخفض بأحد أنواع الغاز التي تتأين ذراتها عند مرور التيار الكهربائي فيها مطلقة ضوء غير مرئي كالضوء فوق البنفسجي أو مرئي بألوان تعتمد على لون الغاز. وللحصول على ضوء أبيض كالضوء القادم من الشمس ترتاح له العين عند رؤيتها للأشياء فإنه يتم طلاء باطن الأنبوب بمادة مستشعة كالفوسفور والفلورايت والتي تحول الضوء الأحادي اللون المنبعث من الغاز إلى ضوء أبيض.

إن تركيب مصباح التفريغ الغازي ليس ببساطة تركيب مصابيح التوهج حيث يحتاج لعدة مكونات لكي يعمل فالتفريغ الكهربائي لا يمكن أن يتم إلا من خلال تسخين الأقطاب التي تنتج إلكترونات كافية لقدح عملية التفريغ وهذا يتطلب تمير تيار كهربائي من خلال دائرة موصولة على التوازي مع مسار التفريغ تسمى دائرة التشغيل (starter) وبمجرد بدء عملية التفريغ يجب فصل هذه الدائرة لتوفير استهلاك الطاقة مما يتطلب جهاز فصل تلقائي وغالبا ما يستخدم ثيرموستات الثنائي المعدني (Bi-metalic thermostat). وتحتاج هذه المصابيح لما يسمى بمنظم التيار (Ballast) حيث أن المقاومة بين طرفي الأنبوب تنخفض بشكل كبير بمجرد بدء التفريغ مما يزيد من شدة التيار والذي بدوره يقلل من قيمة المقاومة وهكذا دواليك منتجا بذلك ما يسمى المقاومة السالبة (negative resistance) ولذلك لا بد من استخدام جهاز للحد من ارتفاع التيار وغالبا ما تستخدم الملفات والمكثفات لهذا الغرض. تتميز المصابيح المستشعة (الفلورسنت) على المصابيح المتوهجة بعدة ميزات منها كفاءة تحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ضوئية حيث تصل إلى 25% في المصابيح المشعة بينما لا تزيد عن 10% في المصابيح المتوهجة ومنها العمر التشغيلي حيث يزيد في المصابيح المشعة بعشرين ضعف عنه في المصابيح المتوهجة والذي لا يتجاوز عمرها في المعدل الألف ساعة. ومقابل هذه الميزات يوجد بعض السيئات للمصابيح المستشعة وهي كبر حجمها فلا تصلح للاستخدام في الأماكن الضيقة وكذلك تعقيد تركيبها وبالتالي ارتفاع ثمنها إلى جانب وجود بعض المخاطر على صحة البشر نتيجة تسرب الأشعة فوق البنفسجية خارج الأنبوبة وتلوث المكان ببخار الزئبق السام في حالة تحطمها وكذلك حاجتها لعدة ثواني لكي تعطي ضوءها.



وفي السبعينات من القرن العشرين ظهرت المصابيح المستشعة المدمجة (compact fluorescent lamp) وهي مصابيح تفريغ بأنابيب قصيرة ملتفة على نفسها لتصغير الحيز الذي تحتله ويستخدم فيها منظمات تيار إلكترونية بدلا من الملفات الكبيرة الحجم وقد تم تصميم أقطابها بحيث توضع على لقواعد مشابهة لقواعد المصابيح المتوهجة وبذلك يمكن تركيبها على نفس مقابس المصابيح المتوهجة. ومن أنواع مصابيح التفريغ المصابيح المسماة مصابيح التفريغ عالية الكثافة (High-intensity discharge (HID) lamp) وهي لا تختلف في تركيبها العام عن مصابيح التفريغ العادية فهي مكونة من أنبوبة زجاجية بقطبين من التنغستون وعند تسليط جهد بين القطبين يحدث تفريغ كهربائي بينهما وعندما يمر هذا القوس الكهربائي خلال ذرات بعض العناصر كبخار الزئبق أو الصوديوم أو الزينون فإنه يولد ضوءا عاليا يستفاد منه بشكل مباشر وذلك على عكس مصابيح التفريغ العادية التي يعمل فيها ضوء القوس على إثارة ذرات المواد

المستشعة التي يطلى بها باطن الأنبوب فتطلق الضوء المطلوب. وتولد مثل هذه المصابيح ضوءا شديدا وبكفاءة عالية ولكن هذا الضوء يحتوي على نسبة عالية من الضوء فوق البنفسجي الضار بالإنسان ولذا يستخدم في إضاءة الأماكن العامة كالشوارع والملاعب والساحات وغيرها. ويوجد آليات متعددة لتوليد الضوء منها ظاهرة الإنبعاث الكهروضوئي (Electroluminescence) والمستخدمة في الثنائيات الباعثة للضوء (Light Emitting Diodes) والليزرات (lasers) حيث تولد الضوء مباشرة من التيار المار في مواد شبه موصلة وغالبا ما تستخدم هذه المصادر كمؤشرات بسبب صغر حجمها وقلة ضوئها وقد تستخدم كمصدر للإضاءة في بعض المصابيح اليدوية والإشارات الضوئية نظرا لطول عمرها التشغيلي الذي قد يصل لعشرات الآلاف من الساعات.

3-6 توليد ونقل وتوزيع الطاقة الكهربائية

يتم في الغالب تزويد الطاقة الكهربائية إلى المستخدمين في الدولة الواحدة من خلال شبكة كهربائية عامة تمتد أسلاكها من محطات التوليد إلى أماكن تواجد هؤلاء المستخدمين مهما كان توزعهم الجغرافي سواء كانوا في البيوت أو المكاتب أو المصانع أو المزارع. وتتكون هذه الشبكة العامة من عدة مكونات وهي محطات التوليد التي تقوم بتحويل مختلف أشكال الطاقة إلى طاقة كهربائية ومن محطات التحويل المختلفة التي تقوم برفع الجهد الكهربائي المنخفض نسبيا الذي تولده محطات التوليد إلى قيم عالية لنقله بأقل فقد ممكن إلى أماكن تواجد المستخدمين وأخرى لخفض الجهد إلى مستويات مناسبة للاستخدام ومن خطوط النقل التي تقوم بنقل وتوزيع الطاقة الكهربائية ومن مراكز المراقبة والتحكم التي تقوم بمراقبة سير عمل مكونات هذه الشبكة وتقوم كذلك بفصل المكونات المعطوبة عن الشبكة لكي لا تتعرض للإنهيار الكامل إلى جانب العدادات التي تقوم بقياس كمية الطاقة التي تسري فيما بين مكونات الشبكة وإلى المستخدمين.

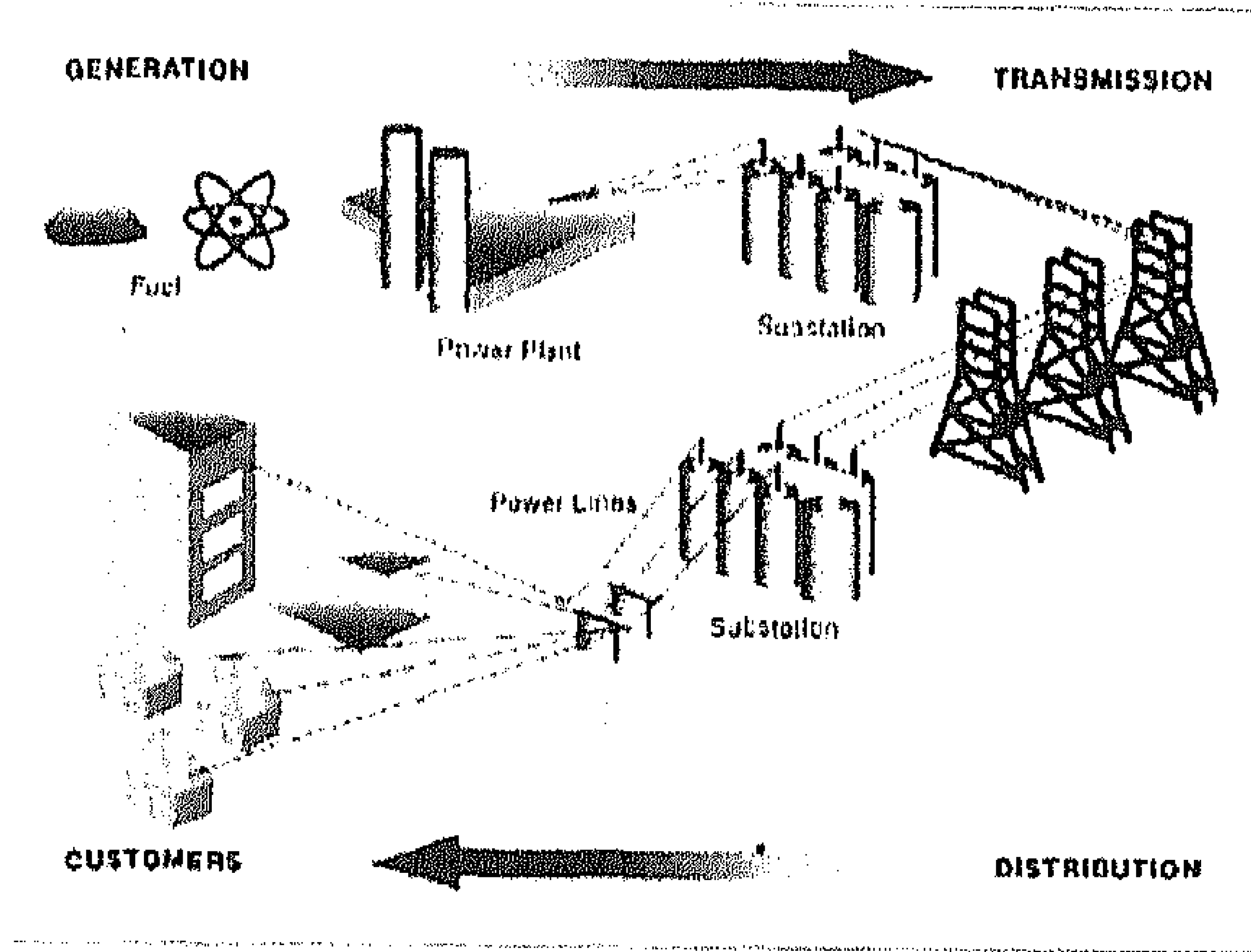
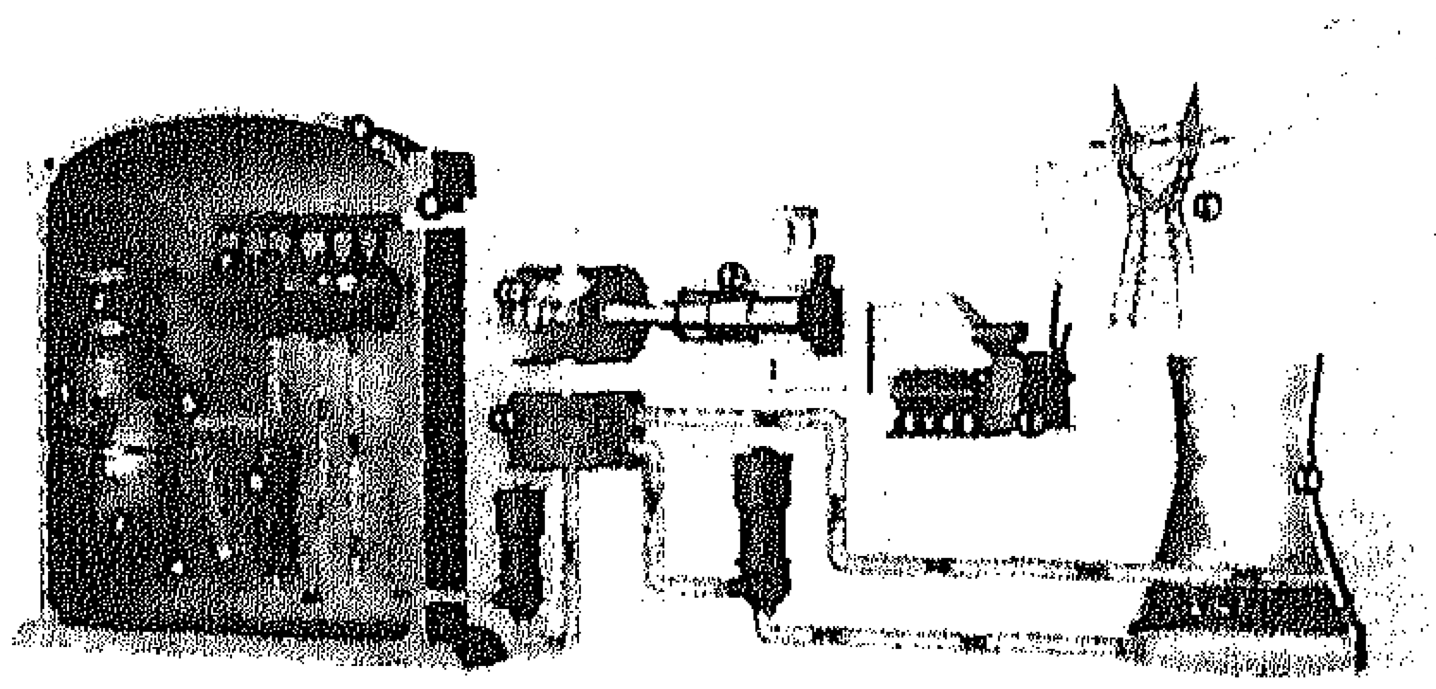


Figure 1.1 Typical Electric Power Supply Systems

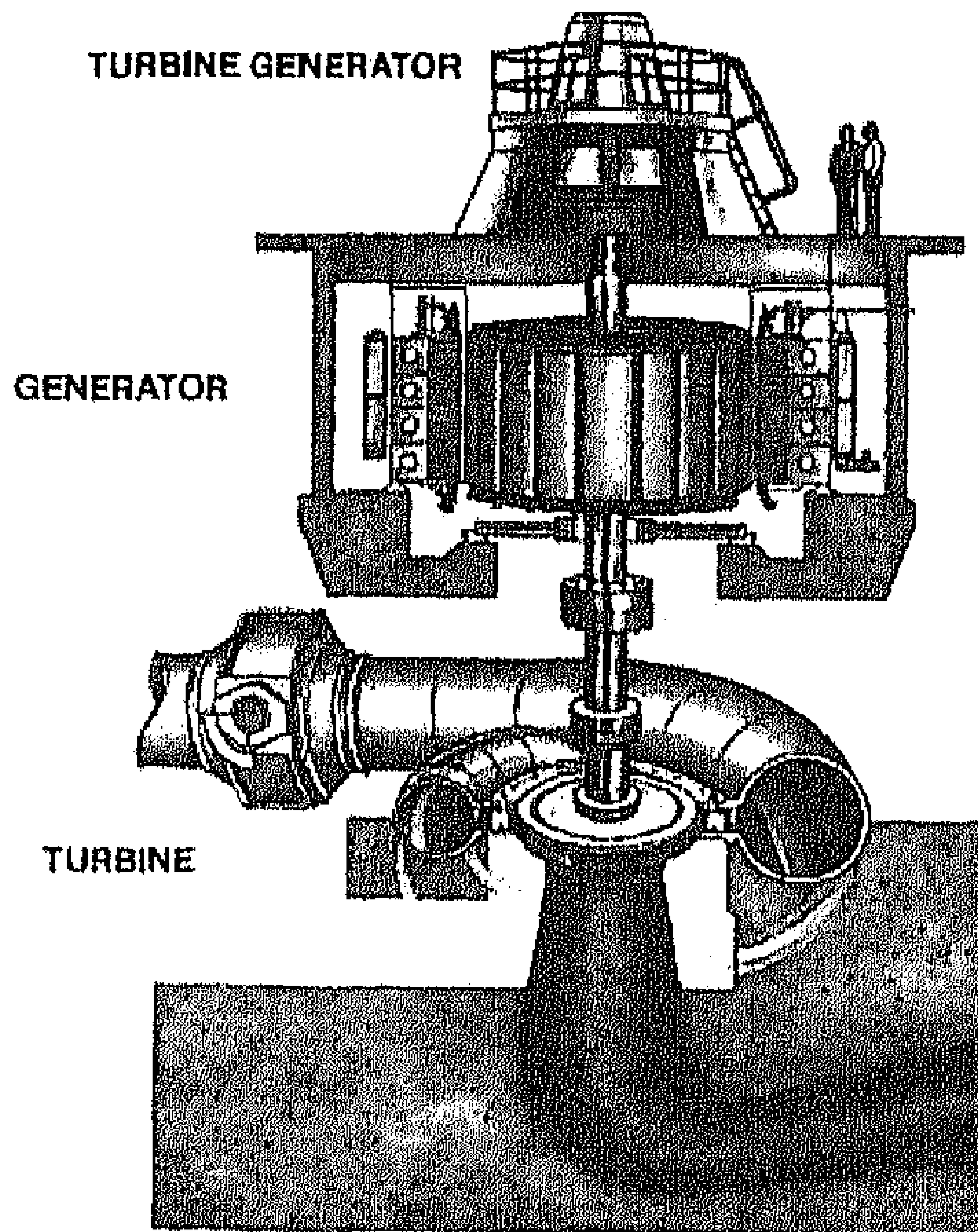
محطات التوليد (Power Stations)

تقوم محطات التوليد الكهربائية بتحويل مختلف أشكال الطاقة إلى طاقة كهربائية ولذلك فإن طريقة تصنيف محطات التوليد تتحدد من نوع مصدر الطاقة الخام المستخدم فيها أو من نوع الطريقة التي يتم بها تحويل الطاقة الخام إلى طاقة حركية من خلال محرك ميكانيكي يدير المولدات



الكهربائية. فالتصنيف من حيث نوع الطاقة يوجد هناك المحطات الكهروحرارية والتي تستخدم الطاقة الكيميائية المخزنة في الوقود الأحفوري كالفحم والبترول والغاز وكذلك في الأخشاب والمخلفات العضوية بعد تحويلها إلى طاقة حرارية والمحطات الكهرومائية والكهروهوائية والتي تستخدم الطاقة الحركية المتوفرة في مياه الشلالات الطبيعية ومياه السدود ومياه المد والجزر وفي الرياح والمحطات الكهروذرية والتي تستخدم طاقة الذرة التي تنتجها المفاعلات الذرية والمحطات الكهروشمسية والتي تستخدم الطاقة الحرارية أو الضوئية المتوفرة في ضوء الشمس والمحطات التي تستخدم حرارة باطن الأرض. أما التصنيف من حيث نوع المحرك الميكانيكي فهنالك أربع أنواع رئيسية وهي التوربينات البخارية (steam turbines) والتوربينات الغازية (gas turbines) والتوربينات المائية والهوائية (water and wind turbines) ومحركات الاحتراق الداخلي (internal combustion engines). فالتوربينات البخارية تعمل على أساس توفر بخار ماء بضغط مرتفع جدا قد يصل إلى عشرة أضعاف الضغط الجوي ويتم ذلك من خلال تسخين البخار إلى ما يقرب من 300 درجة مئوية وعند السماح لهذا البخار الساخن المرتفع الضغط بالخروج من منفث ضيق فإنه ينطلق بسرعة عالية جدا ويكتسب طاقة حركية عالية يتم استغلالها بتسليطه على أنصال مثبتة على محيط عجلة دوارة (توربينة) فتعمل على تدويرها. ويتم إنتاج وتسخين بخار الماء عن طريق حرق الوقود الأحفوري كالفحم الحجري والبترول بأنواعه المختلفة والغاز الطبيعي والمخلفات العضوية والأخشاب وبالحرارة التي تولدها المفاعلات الذرية أو بحرارة باطن الأرض أو بحرارة ضوء الشمس بعد تركيزه. وعلى الرغم من بساطة تركيب التوربين البخاري والذي يتكون من حارقة تقوم بحرق الوقود لتوليد الحرارة الكامنة فيه ومن مرجل لتوليد البخار وتوربينة لتحويل الطاقة الحركية الخطية التي يكتسبها البخار إلى طاقة حركية دورانية فإن تصميمها يتطلب عملا هندسيا معقدا بسبب حاجتها لقطع مصنعة من معادن تتحمل درجة حرارة وضغط وسرعة دوران عالية جدا بالمقارنة مع المحركات الأخرى.

وتعتبر التوربينات البخارية أكثر المحركات شيوعا في محطات التوليد لكونها تعمل باستخدام جميع أنواع الطاقة إذا ما تم تحويلها إلى طاقة حرارية وخاصة أنواع الوقود رخيصة الثمن والتي لا يمكن للتوربينات الغازية ومحركات الاحتراق الداخلي استخدامها كالفحم الحجري والزيت الثقيل التي تخلفه محطات تكرير البترول. وتتميز التوربينات البخارية بالإضافة لكفاءتها العالية التي قد تصل إلى خمسين بالمائة بإمكانية تصنيعها بأحجام وقدرات كبيرة جدا تلبي حاجات المعدات التي تستهلك كميات ضخمة من الطاقة كمحركات مولدات الطاقة الكهربائية ومحركات سفن الركاب والبضائع وناقلات النفط وحاملات الطائرات. أما سيئات التوربينات البخارية فهي صعوبة تصنيعها بأحجام وقدرات منخفضة مع الحفاظ على كفاءتها العالية وحاجتها إلى وقت طويل نسبيا لتشغيلها. أما النوع الثاني فهي التوربينات الغازية (gas turbines) والتي تعمل من خلال حرق الوقود السائل أو الغاز في



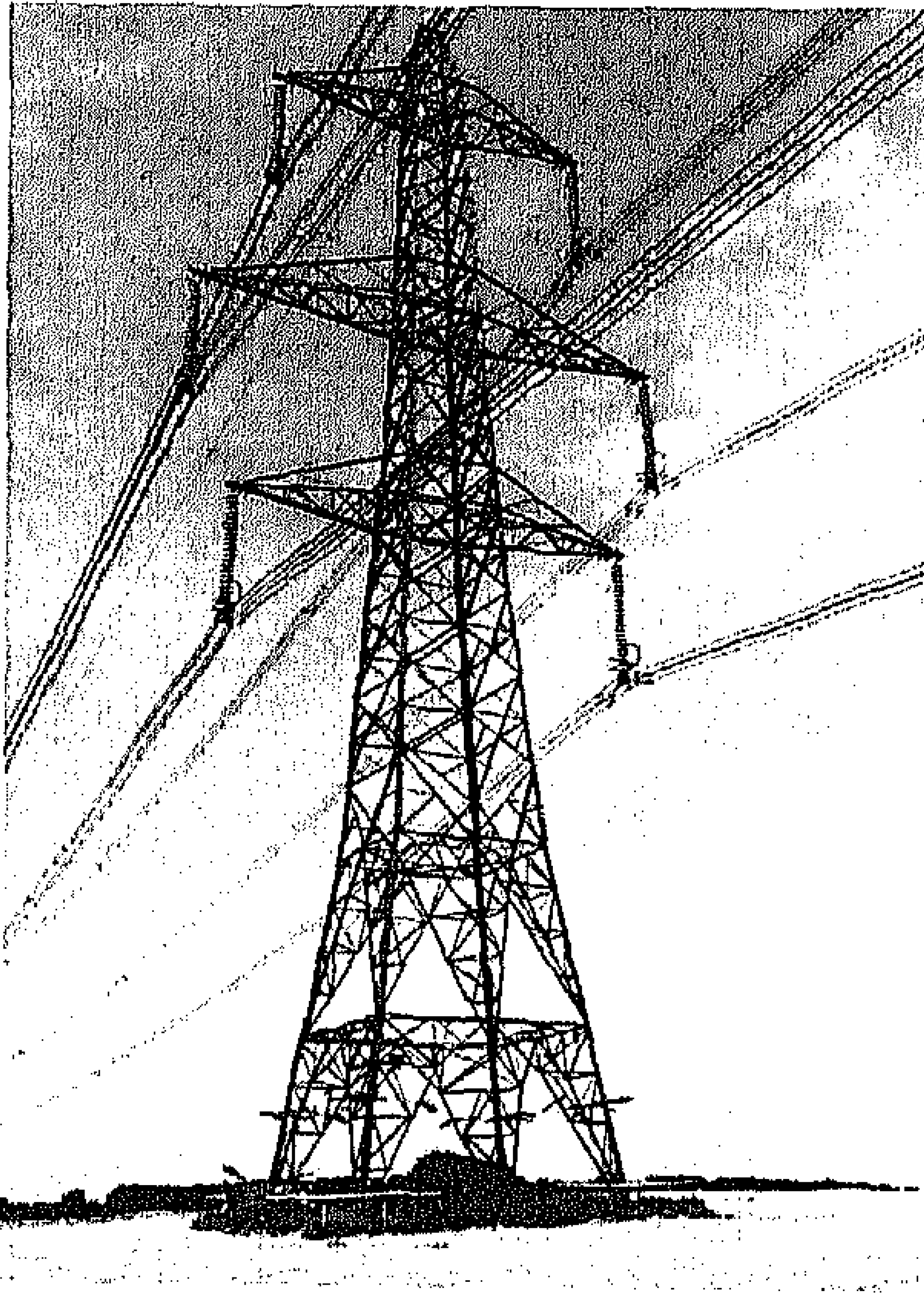
غرفة الاحتراق بعد ضخ كميات كافية من الهواء إليها باستخدام ضاغطات الهواء ومن ثم يتم تسليط تيار الهواء الحار ونواتج الاحتراق عالية الضغط والحرارة على التوربينة لتحريكها. وعلى الرغم من أن كفاءة هذه التوربينات تقل قليلا عن التوربينات البخارية فهي لا تزيد عن خمسة وأربعين بالمائة ولا تعمل إلا على الوقود السائل والغازي إلا أنها تتميز عليها بصغر حجمها وسرعة تشغيلها. ويمكن الاستفادة من الحرارة المتبقية في تيار الهواء والغاز المنبعث من التوربينة الغازية لإنتاج البخار وتشغيل توربينات بخارية وبهذا يتم رفع كفاءة تحويل الطاقة لتصل إلى ستين بالمائة. أما النوع الثالث فهي التوربينات المائية والهوائية (water & wind turbines) والتي يتم تدويرها من خلال تسليط تيارات من الماء أو الهواء على شفرات التوربين يتم الحصول عليها من مياه الشلالات والسدود وهواء الرياح وهي بسيطة التركيب ولا تحتاج إلى تكنولوجيا متقدمة لتصنيعها وهي أول أنواع التوربينات استخداما في محطات توليد الطاقة الكهربائية. أما النوع الرابع فهي محركات الاحتراق الداخلي (internal combustion engines) والتي تعمل على مشتقات البترول السائلة والغازية كالبنزين والسولار (الديزل) والغازات الطبيعية والصناعية. وعلى الرغم من أن كفاءة هذه المحركات لا تتجاوز الثلاثين في المائة لأحسن أنواعها ويوجد كذلك صعوبة في تصنيع أحجام كبيرة منها إلا أن لها ميزات عديدة كسرعة تشغيلها وإمكانية تصنيع أحجام صغيرة منها تناسب بعض التطبيقات كتوليد الطاقة الكهربائية للتجمعات السكانية التي لا تصلها شبكة الكهرباء العامة.

يعتبر المولد الكهربائي قلب محطة التوليد وهو يقوم بتحويل الطاقة الحركية الدورانية التي أنتجتها المحركات الميكانيكية بمختلف أنواعها إلى طاقة كهربائية وغالبا ما يتم ربط المولد بشكل مباشر مع المحرك على نفس محور الدوران. وتستخدم المولدات التزامنية ثلاثية الأطوار في جميع محطات التوليد التي تغذي شبكات الكهرباء العامة ويجب أن تحدد سرعة دوران هذه المولدات بشكل دقيق لتولد تيار متناوب بتردد يبلغ خمسين هيرتز في النظام الأوروبي أو ستين هيرتز في النظام الأمريكي. ولذا فإن تصميم هذه المولدات يعتمد على نوع المحركات التي تديرها ففي حالة التوربينات البخارية والغازية تدار المولدات بسرعة 3000 دورة في الدقيقة أو نصف هذه السرعة في النظام الأوروبي و بسرعة 3600 دورة في الدقيقة أو نصف هذه السرعة في النظام الأمريكي وتستخدم في هذه الحالة مولدات بقطبين للسرعة العالية وأربعة أقطاب للسرعة الأبطأ. أما في حالة التوربينات المائية والهوائية فتدار المولدات بسرعة بطيئة نسبيا لا تتجاوز عدة مئات من الدورات في الدقيقة وتستخدم في هذه الحالة مولدات بعدد كبير من الأقطاب قد تزيد عن مائة قطب. وفي كل الأحوال يجب أن يتم ضبط سرعة المحرك الميكانيكي بشكل بالغ الدقة باستخدام آليات مختلفة تعتمد على نوع المحرك وذلك لضمان ثبات سرعة دوران المولد وبالتالي تردده مهما تغيرت قيمة الحمل المسلط عليه. وبما أن المولدات الكهربائية المستخدمة في محطات التوليد تولد كميات كبيرة من الطاقة قد تتجاوز الألف ميجاواط وبما أن حاصل ضرب الجهد في التيار رقم ثابت يتناسب مع القدرة الكهربائية التي يولدها فإن عملية تصميمها ليست بالعملية السهلة وتحتاج لموازنة كبيرة بين قيم الجهد والتيار المستخدمة فيه للحصول على مولد بأصغر حجم ممكن وأقل فقد ممكن. فرفع التيار على حساب تخفيض الجهد يتطلب ملفات على العضو الساكن بأسلاك ذات مقاطع كبيرة لتقليل الفقد فيها ورفع الجهد على حساب تخفيض التيار يتطلب ملفات ذات عزل جيد. وفي المولدات الحديثة تتراوح قيمة الجهد الأمثل بين عشرة آلاف وثلاثين ألف فولت وقد تصل قيمة التيار إلى خمسين ألف أمبير. وبما أن الجهد الكهربائي ينخفض مع زيادة الحمل فلا بد من وجود آليات تعمل على تثبيت الجهد عند قيمة محددة لدى المستخدمين ويتم ذلك من خلال رفع الجهد الذي تولده المولدات الكهربائية مع زيادة الحمل ويتم ذلك من خلال التحكم بالتيار المباشر الذي يغذي الملفات المغناطيسية على

العضو الدوار باستخدام مولد تيار مباشر أو من خلال تحويل جزء من التيار المتناوب إلى تيار مباشر باستخدام المقومات (rectifiers).

ويمكن تصنيع المولدات الكهربائية بمختلف الأحجام التي تتناسب وقدرات المحركات الميكانيكية التي تديرها وتتراوح القدرات بين عدة ميجاواط لمحركات الاحتراق الداخلي وعدة مئات الميجاواط في التوربنات الغازية وقد تصل إلى ألف وخمسمائة ميجاوات في التوربينات البخارية والمائية. وبسبب التذبذب الكبير في كمية الطاقة الكهربائية التي يستمدها المستخدمين من شبكة الكهرباء العامة وذلك خلال ساعات اليوم وأيام الأسبوع وأشهر السنة فإن تصميم محطات توليد تلبي حاجة المستخدمين في حالات الذروة وبأقل كلفة ممكنة عملية بالغة التعقيد. فبعض المحركات الميكانيكية التي تستمد طاقتها من التوربينات البخارية العاملة بالفحم أو بالطاقة الذرية أو بالطاقة المائية يصعب تخفيض أو رفع طاقتها ولذلك تستخدم لتغطي الحمل الأساسي للشبكة بينما تسخدم التوربينات الغازية وآلات الاحتراق الداخلي التي يسهل التحكم بقدرتها وكذلك إيقافها أو تشغيلها في زمن قصير لتلبية حاجة الشبكة في ساعات الذروة. ويمكن التغلب على مشكلة توفير الطاقة في ساعات الذروة من خلال ربط شبكات الدول المتجاورة مع بعضها البعض وتبادل الطاقة فيما بينها خاصة إذا ما كان هناك اختلاف ولو بسيط في توقيت ساعات الذروة. ويتم التحكم بمحطات التوليد الحديثة باستخدام الحواسيب التي تراقب سير عمل جميع مكونات المحطة وتعمل على تثبيت تردد وجهد الشبكة بشكل دقيق وفي حالة وجود عدد من المحطات التي تغذي الشبكة يجب ضمان تزامن قيم وأطوار وتردد الجهود والتيارات المولدة من قبل هذه المحطات حيث يؤدي عدم التزامن إلى عدم استقرار الشبكة وربما إنهيارها.

محطات التحويل وخطوط النقل



يتم نقل وتوزيع الطاقة الكهربائية من محطات التوليد إلى المستخدمين في شتى مواقعهم من خلال شبكة كهربائية معقدة تحتوي على عدد كبير من محطات تحويل الجهد المختلفة ومن خطوط النقل التي تنقل الطاقة الكهربائية بمستويات جهد مختلفة لا يقل عددها عن أربعة مستويات وذلك حسب حجم الشبكة والتوزع الجغرافي للمستخدمين. ويوجد عند كل محطة توليد محطة تحويل رئيسية تقوم برفع الجهد الذي ينتجه المولد والذي لا يتجاوز ثلاثين ألف فولت إلى جهد عالي تتحدد قيمته من طول خط النقل وكمية الطاقة المنقولة. إن الهدف من رفع الجهد الكهربائي عند نقل الطاقة الكهربائية هو لتقليل كمية الطاقة المفقودة في خطوط النقل حيث أن كمية الفقد تتناسب مع مربع التيار الذي تحمله هذه الخطوط ومن المعلوم أن رفع الجهد بنسبة معينة يقلل قيمة التيار بنفس النسبة على افتراض ثبات كمية الطاقة وعليه فإن كمية الفقد ستتناسب عكسيا مع مربع الجهد. ويعتمد اختيار قيمة جهد النقل على المسافة بين محطة التوليد وأماكن التوزيع وكمية الطاقة المنقولة فكلما زادت المسافة وزادت كمية الطاقة كلما تطلب الأمر زيادة الجهد.

ويمكن تحديد قيمة الجهد الأمثل من خلال الموازنة بين كلفة محطات التحويل وخطوط النقل والتي تزداد مع زيادة قيمة الجهد وبين قيمة الطاقة المفقودة في خطوط النقل على مدى عمرها التشغيلي والتي تزداد مع انخفاض قيمة الجهد.

وفي العادة تستخدم مستويات جهود محددة في صناعة محطات التحويل وخطوط النقل عالية الجهد تبدأ من 110 كيلوفولت وتنتهي بقيمة 765 كيلوفت وقد تتجاوز المليون فولت في بعض الخطوط الخاصة وذلك حسب طول الخط الذي يتراوح بين مائة كيلومتر وما يزيد عن ألف كيلومتر. وعند نهاية خط الجهد العالي يبدأ بتخفيض الجهد بشكل متدرج وليس دفعة واحدة كما هو الحال عند محطة التوليد حيث يتم إنشاء عدة محطات فرعية عند التجمعات السكنية والصناعية الكبيرة تخفض الجهد إلي مستوى الجهد المتوسط (33 كيلوفولت أو 66 كيلوفولت) . وتقوم خطوط نقل الجهد المتوسط بتوزيع الطاقة الكهربائية على محطات فرعية أصغر حجما تتوزع عند مراكز ثقل التجمعات السكنية وتقوم هذه المحطات بدورها بتخفيض الجهد المتوسط إلى الجهد المنخفض (3300 فولت و 6600 فولت). وأخيرا يتم توزيع الطاقة الكهربائية على البيوت والمصانع وغيرها من المرافق بعد أن يتم تخفيض الجهد المنخفض إلى مستوى الجهد الذي تعمل عليه مختلف الأجهزة الكهربائية المنزلية والصناعية وهو 110\190 فولت في النظام الأمريكي أو 220\380 فولت في النظام الأوروبي من خلال محولات صغيرة تركب على الأعمدة. وتستخدم خطوط النقل بكافة مستوياتها نظام النقل ثلاثي الأطوار وما عدا خط النقل الذي يوزع الطاقة على المستخدمين فإن خط النقل يتكون من ثلاثة أسلاك من النحاس أو الألمنيوم معلقة من خلال عوازل من السيراميك أو الزجاج على أبراج فولاذية مختلفة الأحجام في حالة الجهد العالي والمتوسط وأعمدة فولاذية أو خشبية أو كيبلات أرضية في حالة الجهد المنخفض. أما خط النقل الذي يوزع الطاقة على المستخدمين فإنه يتكون من أربعة أسلاك ثلاثة منها تحمل جهود الأطوار الثلاث والرابع أرضي حيث توصل الكهرباء إلى المنازل والمكاتب من خلال خطين فقط أحدهما الأرضي أما المصانع والورش فيتم تزويدها بالطاقة من خلال الأسلاك الأربعة وذلك لأن بعض المعدات الصناعية كالمحركات الكهربائية الكبيرة لا تعمل إلا بثلاثة أطوار. ويتم احتساب كمية الطاقة الكهربائية التي يستهلكها المستخدم من خلال العدادات الكهربائية المثبتة في المنازل والمصانع والورش.

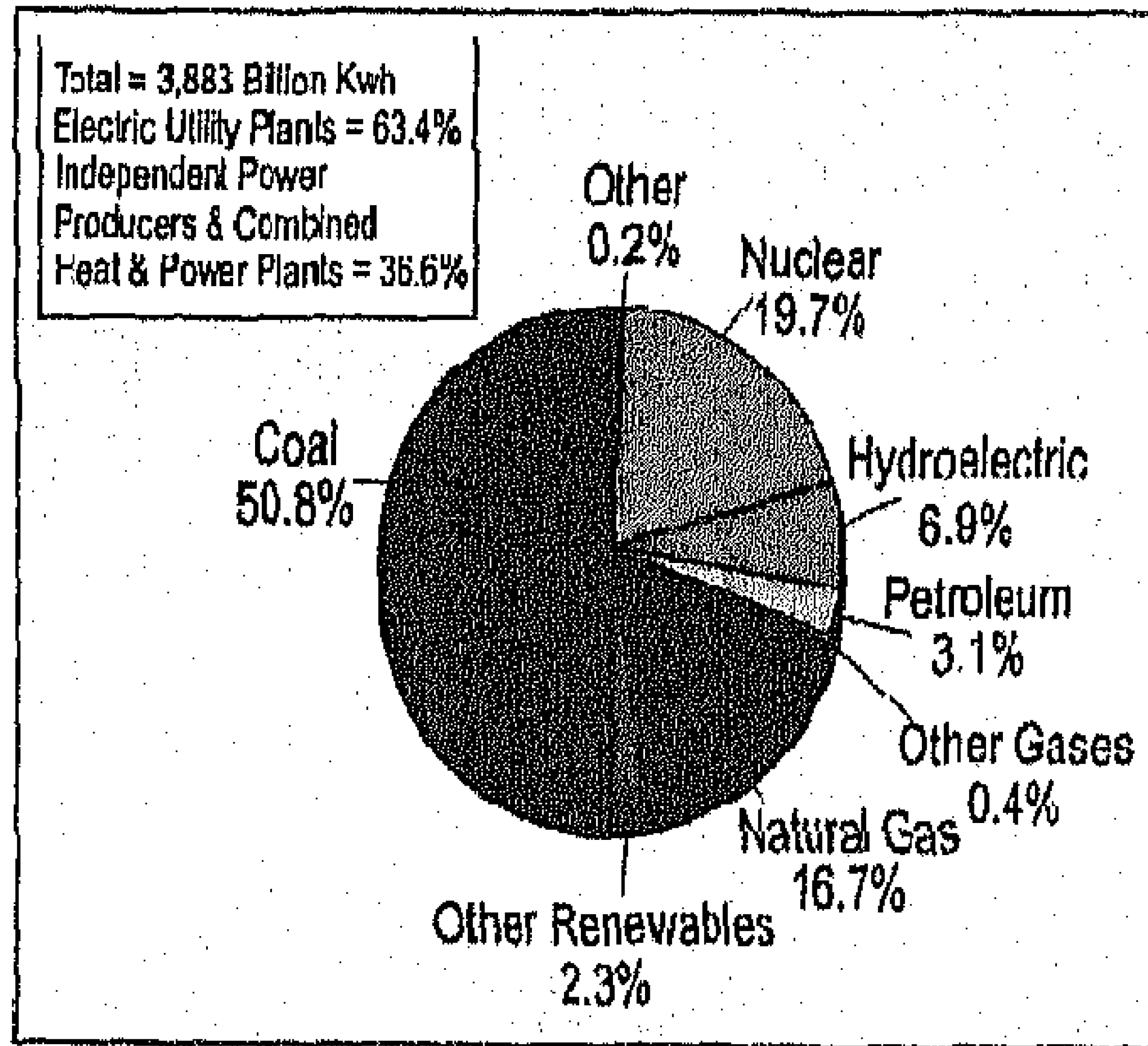


إن شبكات الكهرباء أنظمة بالغة الحساسية فكل مكون من مكوناتها يحس بأي حدث كهربائي يحدث في أي جزء من أجزائها خلال فترة زمنية بالغة القصر حيث تنتشر تأثيرات هذا الحدث في الشبكة بسرعة تقرب من سرعة الضوء. فعلى سبيل المثال فعندما يقوم شخص بكبس زر لإضاءة مصباح كهربائي في بيته فإن جميع محطات التوليد المرتبطة بالشبكة تحس بهذا الحدث وتزيد من عزم محركاتها لتوفير كمية الطاقة التي يحتاجها هذا المصباح لكي يضيئ. إن وصل الأحمال الكهربائية (electric loads) بالشبكة وفصلها عنها عمليات تحدث بشكل كبير ومتكرر على مدار الساعة وهي عمليات قد تؤثر على وضعية الشبكة من حيث قيم ترددها وجهدها وتزامن مولداتها ولكنها في الغالب لا تخرجها من حالة الاستقرار. إن الأحداث التي قد تسبب مشاكل للشبكة وقد تؤدي بها للخروج من حالة الاستقرار هو حدوث دوائر قصر (short circuits)

فيما بين أسلاكها أو بين الأسلاك والأرض أو تعرض بعض محطات التوليد ومحطات التحويل لعطل مفاجئ. وعادة ما يتم حماية الشبكة من دوائر القصر التي تحدث فيها باستخدام الفيوزات (fuses) والقواطع الآلية (automatic circuit breakers) والفواصل اليدوية (manual switch). وتوجد أجهزة الحماية هذه في كل جزء من أجزاء الشبكة فعند المستخدمين يوجد في كل منزل أو مصنع عدد كبير من الفيوزات والقواطع لحماية الشبكة الداخلية للمصلحة من الخراب بسبب دوائر القصر الشائعة الحدوث. وفي كل محطة تحويل رئيسية أو فرعية يوجد أجهزة حماية مماثلة ولكن بقدرات أكبر من تلك التي عند المستخدمين تحمي الشبكة من دوائر القصر التي تحدث في خطوط النقل التابعة لها. وفي كل محطة توليد توجد معدات حماية معقدة تحمي المولدات من دوائر القصر التي تحدث في داخلها أو خارجها وتوجد في محطات التوليد كذلك أحمال اصطناعية تمتص الطاقة الكهربائية التي يولدها المولد في حالة فصله عن الشبكة أو حين تخف الأحمال الحقيقية بشكل مفاجيء. إن ضمان استقرار الشبكات الكهربائية تحت الظروف المختلفة عملية بالغة التعقيد وإن عدم أخذ الاحتياطات اللازمة قد يؤدي إلى خروج الشبكة من حالة الاستقرار وبالتالي الإنهيار التام. ولهذا يوجد في جميع الشبكات الحديثة مراكز متعددة للمراقبة والتحكم (monitor and control centers) تقوم بمراقبة جميع مكونات الشبكة من محطات توليد ومحطات تحويل وخطوط نقل رئيسية وذلك من خلال شبكة اتصالات رقمية تمتد مع امتداد الشبكة وتقوم كذلك بالتحكم بأنظمة الحماية فيها عن بعد إما بشكل يدوي من قبل المهندسين أو بشكل آلي من قبل الحواسيب.

7-3 الإنتاج والإستهلاك العالمي من الطاقة الكهربائية

لقد بلغ الإنتاج العالمي من الطاقة الكهربائية في عام 2000م أربعة عشر ألف بليون كيلواط ساعة أو ما يعادل 48 مليون بليون وحدة حرارية بريطانية. وقد ساهم الفحم الحجري في إنتاج أربعين بالمائة من هذه الطاقة والغاز الطبيعي بخمسة عشر بالمائة والبترول بعشرة بالمائة والمحطات الكهرومائية بتسعة عشر بالمائة والمحطات الكهروذرية بأحد عشر بالمائة والطاقة المتجددة كطاقة الرياح والشمس وغيرها بخمسة بالمائة. وإذا ما افترضنا أن كفاءة التحويل المتوسطة لجميع أنواع المحطات الكهربائية تساوي ثلاثة وثلاثين بالمائة فإن الطاقة الكهربائية تستهلك ما يقرب من أربعين بالمائة من المحتوى الحراري لمختلف مصادر الطاقة التي يتم إنتاجه في العام الواحد.



وقد بلغت القدرة الإجمالية لمحطات التوليد بمختلف أنواعها ثلاثة ملايين ميجاواط تقريبا حيث أنتجت المحطات الحرارية العاملة بالفحم والبترول والغاز 65% بالمائة من هذه القدرة الإجمالية. وأنتجت المحطات الكهرومائية تسعة عشر بالمائة من الطاقة الكهربائية في العالم وتتصدر الصين دول العالم في إنتاج هذا النوع من الطاقة حيث بلغت قدرة محطاتها الكهرومائية 145 ألف ميجاواط تليها كندا بقدرة 88 ألف ميجاواط ثم الولايات المتحدة الأمريكية بقدرة 80 ألف ميجاواط ثم البرازيل بقدرة 70 ألف ميجاواط ثم روسيا بقدرة 45 ألف ميجاواط. ويبلغ متوسط قدرة المحطات

الكهرومائية ألفي ميجاواط ولكن يوجد محطات بسعات قد تصل إلى خمسة عشر ألف ميجاواط كما في بعض سدود الصين. أما المحطات الكهروذرية فأنتجت ما يقرب من 16 بالمائة من مجموع إنتاج الطاقة الكهربائية في العالم حيث بلغ عدد المفاعلات الذرية في عام 2000م 440 مفاعل موجودة في ثلاثين دولة في العالم ويبلغ متوسط قدرة الواحد منها ألف ميجاواط. وتستأثر الولايات المتحدة بحصة الأسد من هذه المفاعلات حيث تملك 104 مفاعلات تليها فرنسا 57 مفاعل ثم اليابان 53 مفاعل ثم بريطانيا 33 مفاعل ثم روسيا 30 مفاعل ثم كندا 21 مفاعل ثم ألمانيا 19 مفاعل. وقد تم استهلاك اثنين وثلاثين بالمائة من مجموع الطاقة الكهربائية المولدة في العالم في أمريكا الشمالية وعشرين بالمائة في آسيا وثمانية عشر بالمائة في أوروبا الغربية وعشرة بالمائة في أوروبا الشرقية بما فيها روسيا وثمانية بالمائة في اليابان وخمسة بالمائة في أمريكا الجنوبية وأربعة في المائة في الشرق الأوسط وثلاثة بالمائة في أفريقيا. ويستهلك القطاع المنزلي خمسة وثلاثين بالمائة من الطاقة الكهربائية لأغراض الإنارة وتشغيل مختلف أنواع الأجهزة الكهربائية المنزلية كالثلاجات والغسالات والمكيفات والمضخات والمكانس والمراوح والتلفزيونات والحواسيب. أما القطاع التجاري فيستهلك ما يقرب من خمسة وثلاثين بالمائة من الطاقة الكهربائية لأغراض الإنارة وتشغيل الأجهزة الكهربائية كالمكيفات والناسخات والطابعات والمصاعد واللافتات الكهربائية والأجهزة الطبية والمخبرية. أما القطاع الصناعي فيستهلك الثلاثين بالمائة المتبقية لتشغيل مختلف أنواع الأجهزة والمعدات الصناعية كالمناشير والمثاقب والمقصات وآلات ومعدات صناعة السيارات والمركبات والطائرات والقطارات والنسيج والورق والأطعمة وغيرها.

الفصل الرابع

الإلكترونيات

4-1 تمهيد

إن التقدم المذهل الذي تشهده البشرية اليوم في جميع المجالات التقنية والمعرفية لم يكن ليتحقق لولا ظهور علم الإلكترونيات في مطلع القرن العشرين. ففي نفس العام الذي كان يعمل فيه الأخوان رايت على تصنيع أول طائرة في تاريخ البشرية وهو عام 1904م كان عالم الفيزياء الإنجليزي فليمنغ يعمل في مختبره المتواضع على تصنيع أنبوب زجاجي مفرغ من الهواء بحجم الإصبع يحتوي عند طرفيه قطبين معدنيين بحيث يسمح للتيار بالمرور في اتجاه واحد فقط. لقد كان الأثر الذي تركه أنبوب فليمنغ على رفاهية البشر في هذا العصر لا يقل أهمية إن لم يزد عن الأثر الذي تركته طائرة الأخوين رايت. فبفضل هذا الأنبوب المفرغ وما تبعه من إنجازات في مجال الإلكترونيات تمكن البشر من التحدث مع بعضهم البعض عبر الهواتف السلكية واللاسلكية رغم تباعد المسافات بينهم ومتابعة كل ما يجري في هذا العالم من أخبار وأحداث من خلال سماع ومشاهدة البث الإذاعي والتلفزيوني الذي ينطلق من آلاف المحطات الموجودة على سطح الأرض أو معلقة في جو السماء. وتمكنوا كذلك من تصنيع الحواسيب التي أحدثت ثورة المعلومات والإنترنت التي لا تقل أهمية عن الثورة الصناعية التي أحدثها اختراع الآلة البخارية.

وعلى الرغم من الدور الكبير الذي لعبته الصمامات الإلكترونية في تقدم أنظمة الاتصالات والحواسيب والقياس والتحكم إلا أن الثورة التي نشهدها اليوم في مختلف المجالات لم تكن لتتحقق لولا اختراع الترانزستور في عام 1947م. فقد أدى استخدام الترانزستور الذي يتميز على الصمام الإلكتروني بصغر حجمه وبقلة استهلاكه للطاقة الكهربائية وبصلادته إلى تقليص كبير في أحجام الأجهزة والمعدات الإلكترونية وقد تمكن المهندسون من تصنيع أنظمة لم يكن بالإمكان تصنيعها باستخدام الصمامات الإلكترونية كالتلفزيونات الملونة والحواسيب والهواتف الخلوية وأنظمة الأقمار الصناعية. وعلى الرغم من الدور الكبير الذي لعبه الترانزستور في تقليص أحجام الأجهزة الإلكترونية إلا أن أسلاك التوصيل بين الترانزستورات وبقية القطع الإلكترونية المكونة للدائرة الإلكترونية أصبحت عائقا يحول دون تصنيع أجهزة إلكترونية متطورة وصغيرة الحجم تحتوي على أعداد كبيرة من الترانزستورات كما هو الحال في الحواسيب والتلفزيونات الملونة والهواتف المتنقلة. ولقد تم التغلب على هذه المشكلة بعد أن تمكن المهندسون في نهاية الخمسينات من تصنيع أكثر من ترانزستور مع يلزمها من مقاومات ومكثفات على سطح رقاقة صغيرة من السيلكون وتم توصيل المكونات فيها بشرائط معدنية رقيقة يتم ترسيبها على سطح الرقاقة بما يسمى الدائرة المتكاملة. وفي عام 1961م تنبأ أحد العاملين في مجال تطوير الدوائر المتكاملة وهو المهندس مور مؤسس شركة إنتل التي تعتبر من أكبر شركات إنتاج الدوائر المتكاملة في الولايات المتحدة الأمريكية بأن عدد الترانزستورات على الرقاقة الواحدة سيتضاعف كل ثمانية عشر شهرا. ولقد صدقت توقعاته إلى حد كبير حيث تضاعف عدد الترانزستورات على الرقاقة الواحدة من عشرة ترانزستورات في بداية الستينات إلى ما يزيد عن عشرة ملايين ترانزستور مع نهاية القرن العشرين.

إن الوظيفة الأساسية للترانزستور وكذلك سلفه الصمام الإلكتروني هو في إمكانية التحكم بالتيار

المار بين طرفين من أطرافه من خلال تيار أو جهد صغير يتم تسليطه على الطرف الثالث. إن هذه الوظيفة البسيطة قد تم استغلالها للقيام بوظائف أكثر تعقيدا وبني على أساسها أجهزة ومعدات بالغة التعقيد تلعب دورا بالغ الأهمية في حياة الناس كأنظمة الاتصالات المختلفة وأنظمة البث الإذاعي والتلفزيوني والحواسيب وشبكات المعلومات وأنظمة التحكم والقياس وفي الأجهزة الطبية وغيرها الكثير. فبدون الترانزستور لا يمكن لجميع هذه الأجهزة والأنظمة أن تعمل بالشكل التي هي عليه ولهذا فقد عد العلماء اختراع الترانزستور كأعظم اختراع في القرن العشرين ولذلك نال مخترعيه في عام 1956م جائزة نوبل تقديرا لجهودهم وتأكيدا على أهمية هذا الاختراع وذلك حتى قبل أن تظهر التطبيقات التي بنيت على أساسه. ولا يوجد حتى الآن أي عنصر إلكتروني يمكنه أن يحل محل الترانزستور في صناعة الإلكترونيات على الرغم من البحث المتواصل لإيجاد بديل عنه. وعلى الرغم من أن اختراع الترانزستور يعد أعظم اختراع في القرن العشرين إلا أن اختراع البطارية وكذلك المولد الكهربائي في مطلع القرن التاسع عشر يفوق اختراع الترانزستور عظمة فالترانزستور لا يمكنه أن يعمل إلا بوجود الكهرباء. وتجري الآن أبحاث في مجال الإلكترونيات الضوئية يعمل الباحثون من خلالها على دراسة إمكانية تصنيع ترانزستور ضوئي يكون الضوء هو الحامل للإشارات بدلا من الإلكترونات مما يعني رفع سرعة معالجة المعلومات بشكل كبير وذلك لأن سرعة انتقال الضوء أعلى منها بكثير من سرعة الإلكترونات.

2-4 الصمامات الإلكترونية (Electronic Valves)

لقد تم اختراع أول عنصر فعال في عالم الإلكترونيات وهو الصمام الثنائي (diode) على يد عالم الفيزياء الإنجليزي جون فليمنغ (John Ambrose Fleming) وذلك في عام 1904م. ويتكون الصمام من أنبوب زجاجي مفرغ (vacuum tubes) من الهواء يوجد في داخله عند طرفيه قطبين كهربائيين يسمى أحدهما المهبط (cathode) والآخر المصعد (anode) ويوجد تحت المهبط دائرة تسخين كهربائية تعمل على تسخين المادة المعدنية التي يصنع منها المهبط والتي تطلق سيل من الإلكترونات الحرة عند تسخينها. وعند تسليط جهد موجب على المصعد يقوم بجذب الإلكترونات المنبعثة من المهبط مما يؤدي إلى سريان تيار كهربائي في الدائرة الكهربائية الخارجية للصمام أما عند تسليط جهد سالب على المصعد فإن سريان التيار يتوقف على الفور أي أن هذا العنصر الإلكتروني يسمح بمرور التيار باتجاه واحد فقط ويمنع مروره في الاتجاه المعاكس. ولذلك فقد كان أول استخدام عملي لهذا العنصر البسيط في دوائر التقويم ودوائر الكشف. أما الاختراع الأكثر أهمية في عالم الإلكترونيات فقد تحقق على يد المهندس الكهربائي والمخترع الأمريكي لي دي فورست (Lee De Forest) وذلك في عام 1906م عندما تمكن من إضافة شبكة معدنية تقع بين المهبط والمصعد ليحول بذلك الصمام الثنائي إلى صمام بثلاثة أقطاب (triode) وقد أطلق اسم الشبكة (Grid) على هذا القطب الثالث. وتكمن أهمية الشبكة بقدرتها على التحكم بقيمة التيار العالي نسبيا الذي يسري بين المهبط والمصعد

The DeForest "Audion" tube

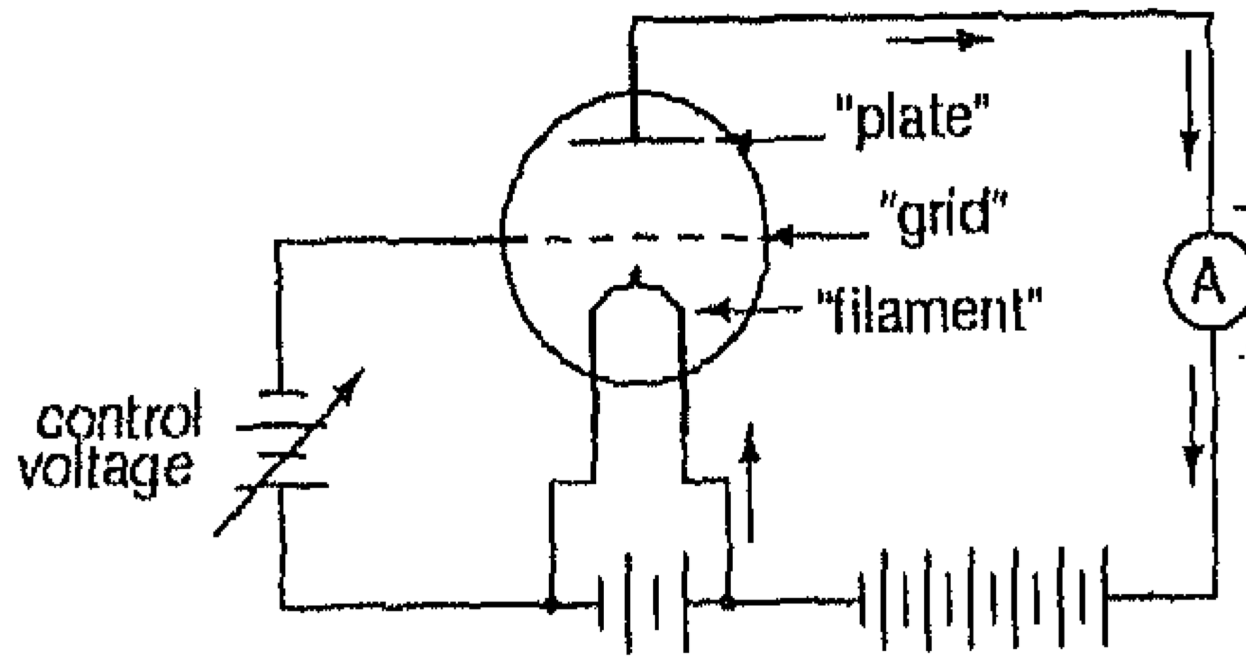
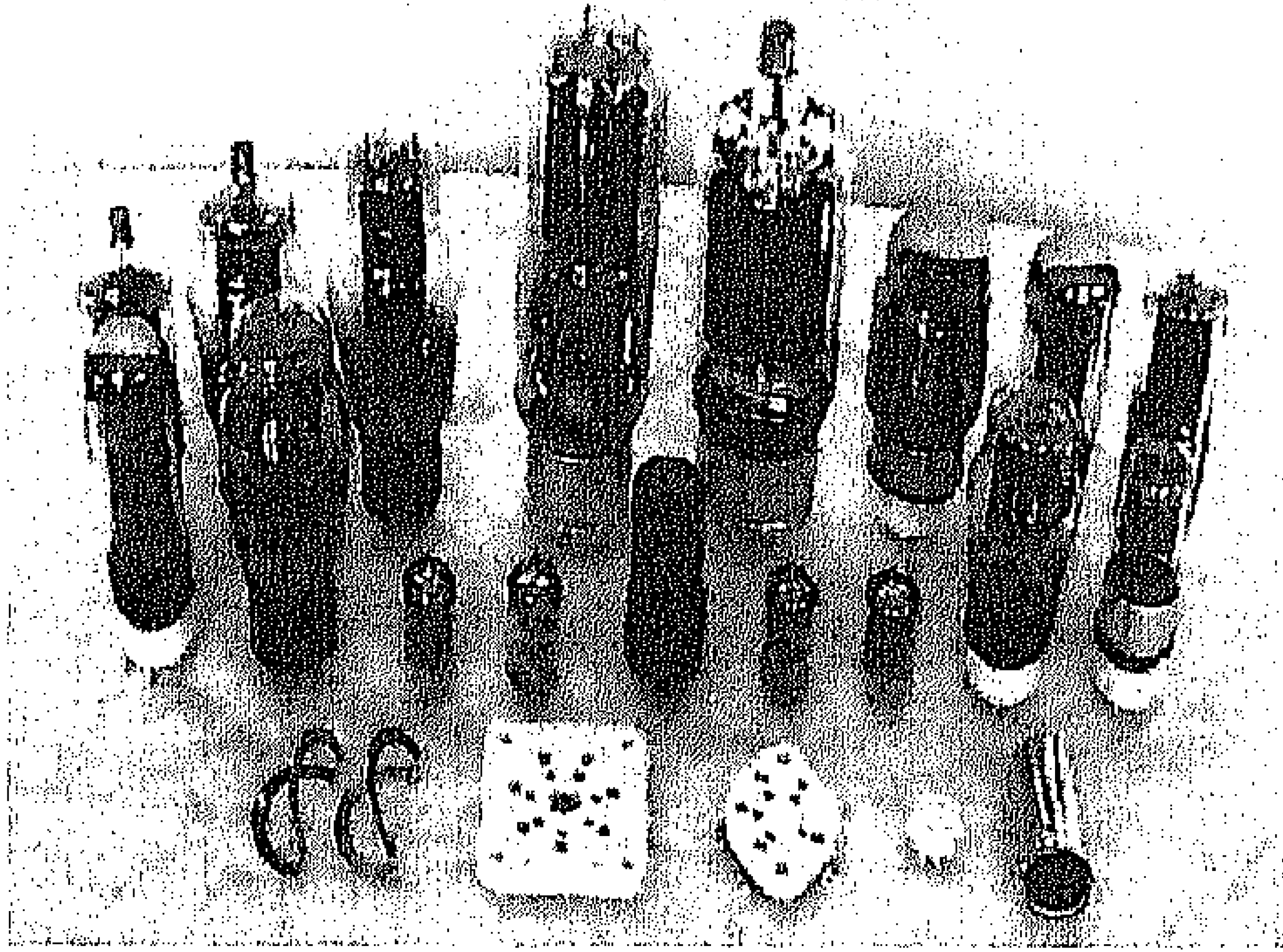


plate current can be controlled by the application of a small control voltage between the grid and filament!

وذلك من خلال تسليط قيم صغيرة من الجهد الكهربائي عليها. ولقد تم تطوير الصمام الثلاثي لتحسين أدائه من خلال إضافة عدد من الشبكات يستخدم بعضها لمنع التذبذب الداخلي في المضخمات وبعضها لبناء دوائر المزج (mixers) فظهرت بذلك الصمامات الرباعية (tetrodes) والخماسية (pentodes).

ومع اختراع الصمام الثلاثي أصبح بالإمكان بناء أهم دائرتين كهربائيتين كان مهندسو الاتصالات في أمس الحاجة إليهما لتطوير قدرات أنظمة الاتصالات وهما دائرة التذبذب (المذبذب) ودائرة التضخيم (المضخم). فالمذبذب يقوم بتوليد إشارات كهربائية ذات ترددات مختلفة وذلك من خلال تحويل التيار الثابت إلى تيار متردد حيث يتم التحكم بقيمة التردد باستخدام عناصر غير فعالة كالمحثات والمكثفات والمقاومات في الدائرة الخارجية للصمام الثلاثي. أما المضخم فيقوم بتضخيم الإشارات الكهربائية الحاملة للمعلومات والتي تضعف بشكل كبير عند انتقالها من المرسل إلى المستقبل عبر مختلف قنوات الاتصال. وبهذا الاختراع العظيم حدثت نقلة نوعية في مختلف مجالات الهندسة الكهربائية ففي عام 1913م تم إجراء أول مكالمة هاتفية لاسلكية بين بريطانيا وأميركا بعد أن تم استخدام المضخمات الكهربائية. وتم كذلك بناء أنظمة البث الإذاعي في عام 1918م وأنظمة البث التلفزيوني في عام 1935 وبذلك بعد أن تمكن المهندسون من بناء مستقبلات قادرة على التقاط الإشارات الضعيفة جدا التي تبثها محطات البث الإذاعي والتلفزيوني. وعلى الرغم من الدور الكبير الذي لعبه الصمام الثلاثي في تقدم الأنظمة الكهربائية وخاصة أنظمة الاتصالات إلا أن بعض عيوبه وقفت حجر عثرة أمام طموح المهندسين في بناء أنظمة إلكترونية متطورة. إن من أهم عيوب الصمام الإلكتروني كبر حجمه الذي لا يقل عن حجم الإصبع واستهلاكه العالي للطاقة الكهربائية حيث لا يعمل إلا عند جهد كهربائي مرتفع يصل لعشرات الفولتات إلى جانب حاجته لدائرة كهربائية مستقلة لتسخين المهبط. أما عيبه الأكبر فهو أنه مصنوع من الزجاج ولذا فهو معرض للكسر عند تعرضه للصدمات مما حال دون استخدامه في كثير من التطبيقات. ولبيان مدى تأثير هذه العيوب على تصنيع الأنظمة الكهربائية نورد المثال التالي فعند تصنيع أول حاسوب رقمي في عام 1945م بلغ عدد الصمامات المستخدمة فيه ثمانية عشر ألف صمام احتلت ما مساحته ستين مترا مربعا وكان يستهلك من الطاقة الكهربائية ما يزيد عن مائة وخمسون كيلواط على الرغم من أن قدرته الحسابية لا تتجاوز قدرة أصغر الحواسيب التي تم تصنيعها في السبعينات والتي تم تصنيع جميع مكوناتها على دائرة متكاملة واحدة لا يتجاوز حجمها حجم صمام إلكتروني واحد ولا يزيد استهلاكها من الطاقة عن واط واحد. وعلى الرغم من أن الترانزستورات قد حلت محل الصمامات في كثير من التطبيقات إلا أن الصمامات العالية القدرة لا زالت مستخدمة في التطبيقات التي يلزمها قدرة عالية كمحطات البث الإذاعي والرادارات.



3-4 المواد شبه الموصلة (Semiconductor Materials)

لقد تم استخدام المواد شبه الموصلة في صناعة الترانزستور لما تتميز به هذه المواد من خصائص

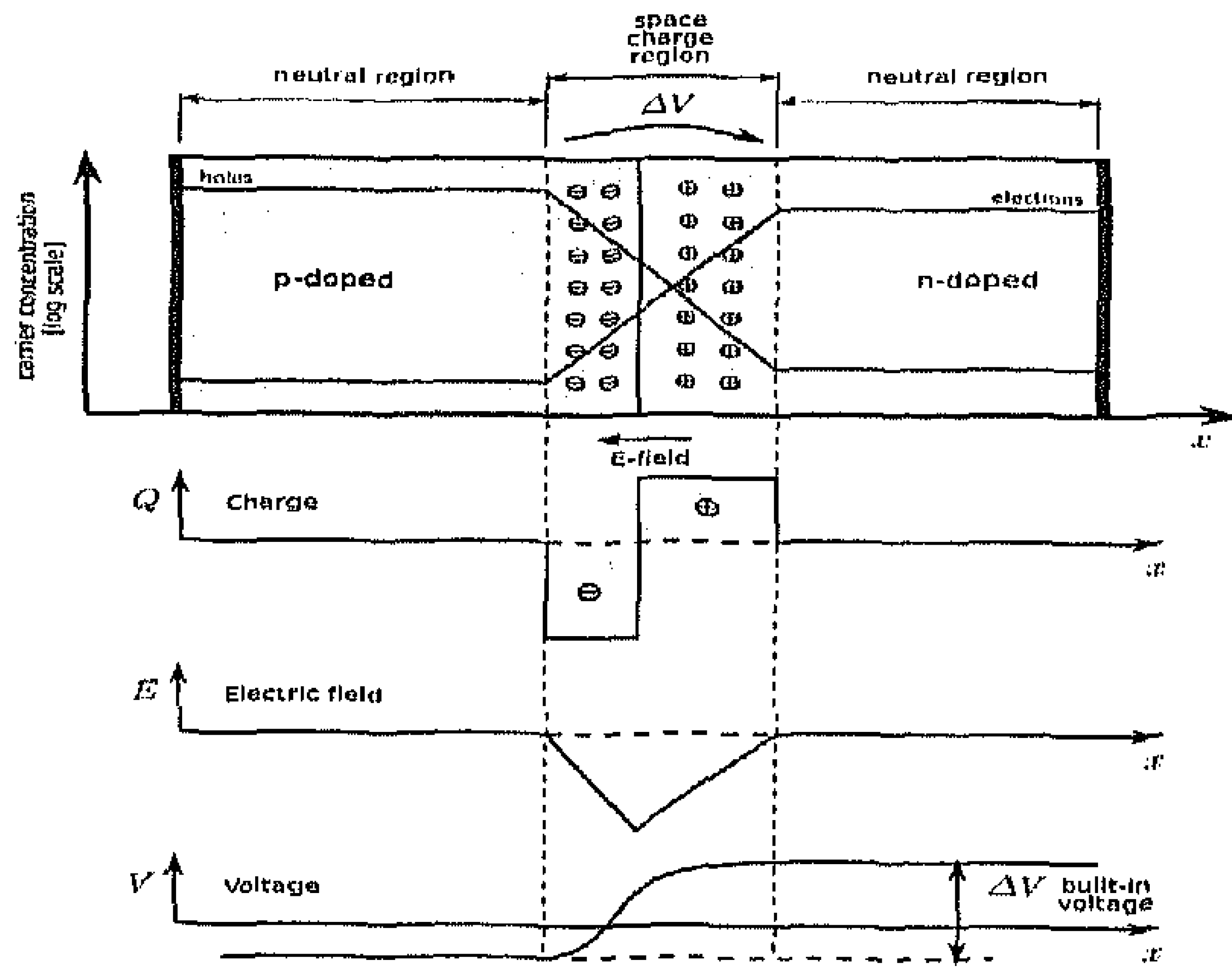
فريدة عند توصيلها للكهرباء فهي تختلف عن المواد الموصلة للكهرباء بإمكانية التحكم في درجة توصيلها من خلال إضافة شوائب من عناصر محددة في بنيتها البلورية. وتتوفر المواد شبه الموصلة على الأرض إما على شكل عناصر فيزيائية خالصة تقع في العامود الرابع من الجدول الدوري وهي عنصري الجرمانيوم والسيليكون أو من مواد مركبة ناتجة عن خلط بعض عناصر العمود الثالث كالبورون والألمنيوم والأنديوم والقاليوم مع عناصر العمود الخامس كالفوسفور والزرنيخ (الأرسنيد) والبزموث منتجة مواد شبه موصلة كفوسفيد الإنديوم وأرسنيد القاليوم وغيرها من المركبات التي قد تتفوق على العناصر شبه الموصلة الخالصة في بعض خصائصها الكهربائية. لقد كان الجرمانيوم هو العنصر المستخدم في صناعة الترانزستورات في بداية عهدها إلا أنها لم تكن تعمل بشكل موثوق إلا عند درجات الحرارة التي تقل عن أربعين درجة مئوية وذلك بسبب حساسية الجرمانيوم العالية للحرارة والتي تعود لتدني قيمة فجوة الطاقة (energy gap) بين نطاقي التكافؤ والتوصيل (conduction & valence bands) فيها والتي يبلغ 0.7 إلكترون فولت.

وفي عام 1954م تمكن المهندسون من استخدام السيليكون في صناعة الترانزستور بعد التغلب على بعض المشاكل التصنيعية. ويتميز السيليكون على الجرمانيوم بكبر قيمة فجوة الطاقة فيه حيث تبلغ 1.1 إلكترون فولت مما يعطيه ثباتا كبيرا في خصائصه الكهربائية يمتد على نطاق واسع من درجات الحرارة. ومن حسنات السيليكون أن مادته الخام وهي ثاني أكسيد السيليكون (SiO_2) متوفرة بكميات كبيرة في الطبيعة خاصة في رمال الصحراء. إن المواد شبه الموصلة النقية تعتبر مواد عازلة للكهرباء ولكن يمكن تحويلها إلى مواد موصلة من خلال إضافة شوائب من مواد محددة حيث تزيد موصليتها مع زيادة نسبة الشوائب فيها. ويتم التحكم بدرجة توصيل مادة السيليكون النقي أو غيره من المواد شبه الموصلة من خلال إضافة مواد شائبة في بنيتها بما يسمى عملية التطعيم (doping). ويوجد نوعان من التطعيم فالنوع الأول يتم من خلال إضافة مادة شائبة بمقدار ضئيل ومحدد مأخوذة من عناصر العامود الخامس في الجدول الدوري كالفوسفور مثلا ويكون الناتج في هذه الحالة مادة شبه موصلة تمتلك فائض من الإلكترونات الحرة ويطلق على هذا النوع من المواد الشائبة اسم المواد المانحة (donars). ويساوي عدد الإلكترونات الفائضة عدد ذرات المادة الشائبة المضافة ويطلق على هذه المادة شبه الموصلة المطعمة شبه موصل من النوع السالب (N-type) وذلك لأن الإلكترونات ذات الشحنات السالبة هي المسؤولة عن حركة التيار الكهربائي فيها. أما النوع الثاني فيتم تصنيعه من خلال إضافة مادة شائبة من عناصر العامود الثالث في الجدول الدوري كالبورون مثلا منتجة بذلك مادة شبه موصلة تفتقر إلى الإلكترونات الحرة في المدار الخارجي لذراتها وقد أطلق العلماء على هذا المكان الخالي من الإلكترون اسم الفجوة (hole) ويطلق على هذا النوع من المواد الشائبة اسم المواد القابلة (acceptors).

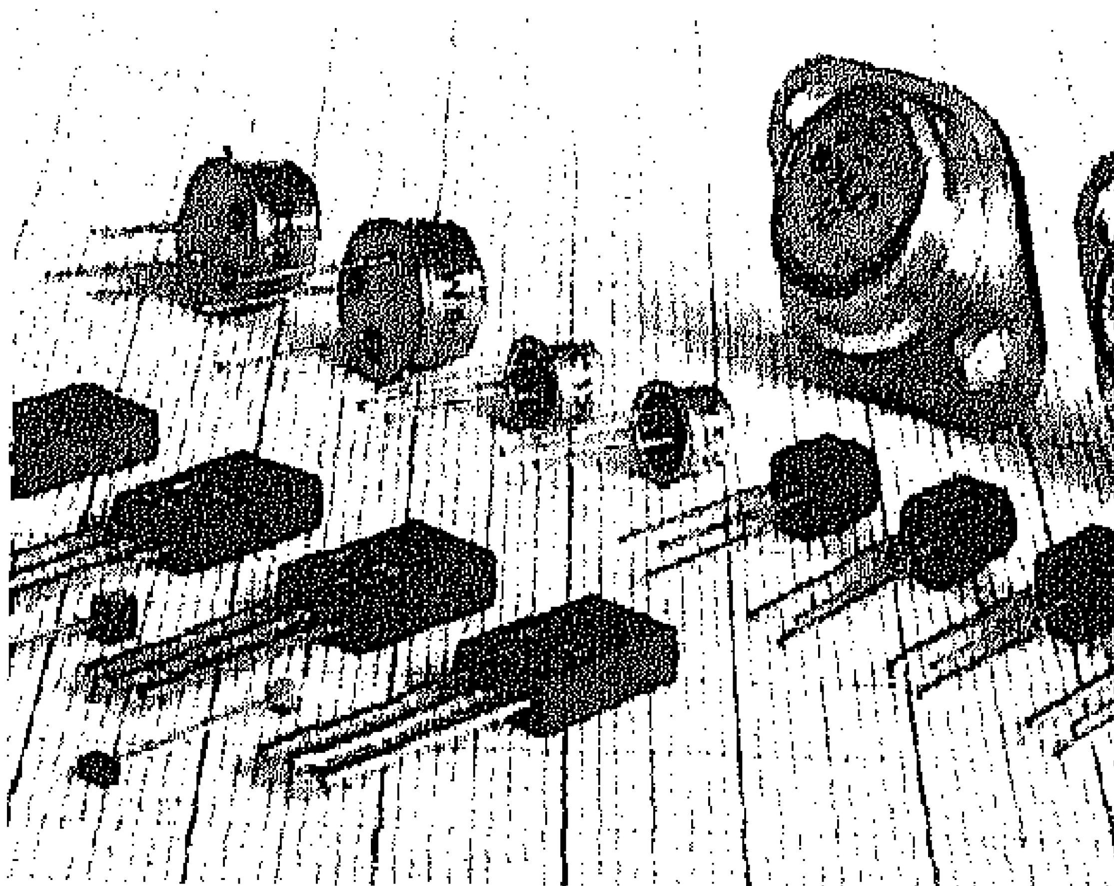
وعند تسليط جهد كهربائي على هذه المادة المطعمة فإن الفجوات ستتحرك عند انتقال الإلكترونات إليها بعكس اتجاه حركة الإلكترونات ولذا يمكن تخيلها على أنها حاملة لشحنات موجبة ولذلك يطلق على هذه المادة المطعمة شبه موصل من النوع الموجب (P-type). وعند تطعيم منطقتين متجاورتين على بلورة من مادة شبه موصلة كالسيليكون مثلا بحيث تكون أحدهما من النوع السالب والأخرى من النوع الموجب فإنه يتكون عند الحد الفاصل بينهما منطقة تسمى المنطقة المنضبة (depletion region). وتتكون هذه المنطقة نتيجة لهجرة الإلكترونات الزائدة الموجودة في المنطقة السالبة إلى المنطقة الموجبة لتملأ الفجوات الموجودة فيها ولكن هذه الهجرة ستقتصر فقط على الإلكترونات الموجودة في المناطق المجاورة للحد الفاصل بين المنطقتين. ويعود السبب في ذلك إلى أن الإلكترونات المهاجرة ستترك خلفها ذرات موجبة الشحنة وعند

وصولها إلى المنطقة الموجبة فإنها ستحول ذراتها إلى ذرات سالبة الشحنة وبهذا سيتكون فرق جهد بين طرفي المنطقة المنضبة وإذا ما وصل فرق الجهد هذا إلى قيمة معينة فإن المجال الكهربائي الناتج عنه سيحول دون هجرة مزيد من الإلكترونات. ويطلق على فرق الجهد هذا أسماء عدة منها جهد الوصلة (junction voltage) أو جهد الحجز (barrier voltage) أو الجهد المبيت (built-in voltage) وتتحدد قيمته وكذلك مقدار عرض المنطقة المنضبة بشكل رئيسي من نوع المادة شبه الموصلة وبشكل ثانوي من تركيز التطعيم في المنطقتين وتبلغ قيمته 0.7 فولت تقريبا للسيليكون و 0.27 فولت للجرمانيوم.

إن مبدأ عمل الترانزستورات وكذلك الثنائيات يعتمد على وجود هذه المنطقة المنضبة فعند تسليط فرق جهد من مصدر خارجي على طرفي المنطقتين من النوع الموجب والسالب أو ما يسمى بوصلة موجب-سالب (PN junction) فإنه يمكن التحكم بعرض هذه المنطقة المنضبة وكذلك فرق الجهد المحصل عليها. فعندما يتم وصل الطرف الموجب للمصدر بالمنطقة الموجبة والقطب السالب بالسالبة فإن إتجاه المجال الكهربائي المسلط سيكون بعكس إتجاه المجال الكهربائي المبيت فيعمل على تقليله وعندما تصل قيمة الجهد المسلط قيمة الجهد المبيت فإن المنطقة المنضبة ستختفي تماما وسيمر تيار كهربائي من خلال الوصلة ويسمى هذا النوع من التسليط للجهد بالإنحياز الأمامي (forward bias). أما إذا تم وصل الطرف الموجب للمصدر بالمنطقة السالبة والسالب بالموجبة فإن إتجاه المجال الكهربائي المسلط سيكون بنفس إتجاه المجال الكهربائي المبيت فيعمل على تقويته مما يمنع مرور أي تيار من خلال الوصلة ويسمى هذا النوع من التسليط للجهد بالإنحياز العكسي (backward bias). إن مثل هذه الجهاز الإلكتروني البسيط المكون من وصلة واحدة (single junction) يعمل كثنائي (diode) يسمح بمرور التيار في إتجاه معين ولا يسمح بمروره في الإتجاه المعاكس ولهذه الثنائيات تطبيقات واسعة سنبينها في حينها.

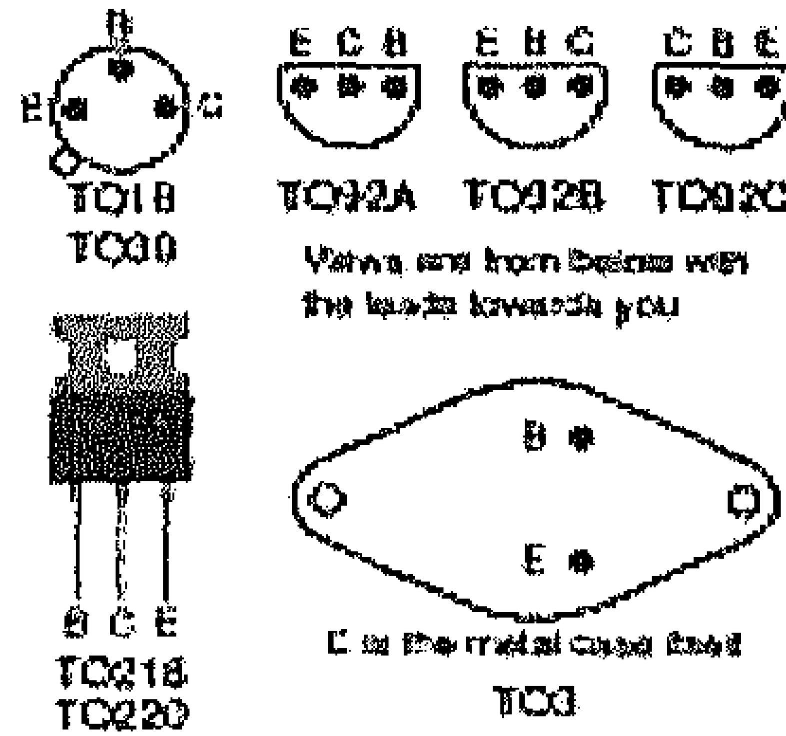


4-4 الترانزستورات (Transistors)



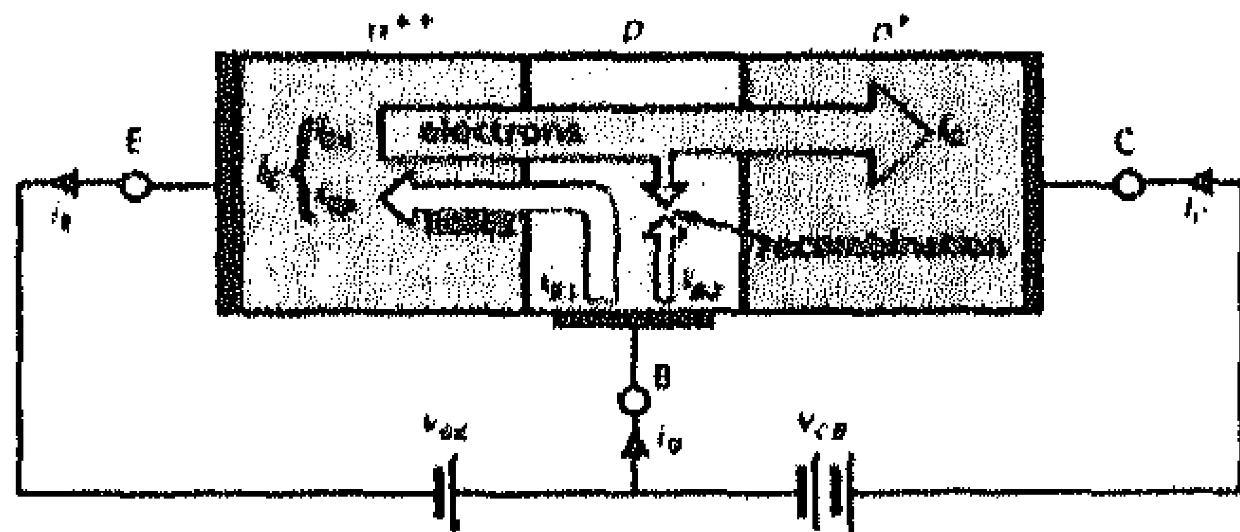
لقد تم التغلب على جميع عيوب الصمام الإلكتروني بإختراع الترانزستور في عام 1947م وذلك على يد ثلاثة من الفيزيائيين الأميركيين العاملين في مختبرات بيل الأمريكية وهم جون باردين (John Bardeen) وولتر براتين (Walter Brattain) ووليم شوكلي (William Shockley) والذين حصلوا على جائزة نوبل في عام 1956م تقديرا لجهودهم على هذا الإنجاز العظيم. والترانزستور عنصر إلكتروني فعال

(active device) مصنوع من مواد شبه موصلة كالجرمانيوم والسيليكون وله ثلاثة أقطاب كما هو الحال مع الصمام الثلاثي ولكن بدون دائرة تسخين. ويتميز الترانزستور على الصمام الإلكتروني بصغر حجمه الذي لا يتجاوز إذا ما صنع منفردا حجم حبة الحمص أما إذا كان في دوائر متكاملة فإنه بالإمكان تصنيع ملايين الترانزستورات على شريحة لا تتجاوز مساحتها السنتيمتر المربع الواحد مما أدى إلى تقليص بالغ في أحجام وأوزان الأجهزة الكهربائية. ويتميز كذلك بأنه يعمل على جهد كهربائي منخفض لا يتجاوز عدة فولتات وبقلة استهلاكه للطاقة الكهربائية التي تقاس بالميللي واط في الترانزستورات المنفردة والميكروواط وحتى النانوواط في الدوائر المتكاملة مما أدى إلى تصنيع أجهزة كهربائية مختلفة تعمل بالبطاريات الصغيرة ولفترات طويلة من الزمن. ويتميز بصلادته فهو جسم مصمت من مواد شبه موصلة حيث لا توجد في داخله أجزاء متحركة ولذلك فهو لا يتأثر بالصدمات والإهتزازات الميكانيكية كما هو الحال مع الصمام الإلكتروني ولذا يمكن وضعه في الأجهزة المحمولة. ويتميز كذلك بطول عمره التشغيلي الذي يمتد لعشرات السنوات وبإمكانية عمله على نطاق واسع من درجات الحرارة وبإمكانية إنتاجه بكميات كبيرة جدا وبأسعار منخفضة جدا. ومع اختراع الترانزستور الذي يعده العلماء أعظم اختراع في القرن العشرين تجددت آمال المهندسين في صنع معدات وأجهزة إلكترونية صغيرة الحجم وقليلة الاستهلاك للطاقة كالحواسيب الرقمية والتلفزيونات الملونة والراديوات الصغيرة والهواتف المحمولة والآلات الحاسبة المكتبية واليدوية. وكذلك فإنه لا يوجد الآن ما يحول دون وضع المعدات والأجهزة الإلكترونية في مختلف أنواع المركبات والصواريخ العابرة للقارات وفي المركبات الفضائية والأقمار الصناعية حيث أنها لا تحتل حيزا كبيرا ويمكنها أن تعمل على البطاريات.



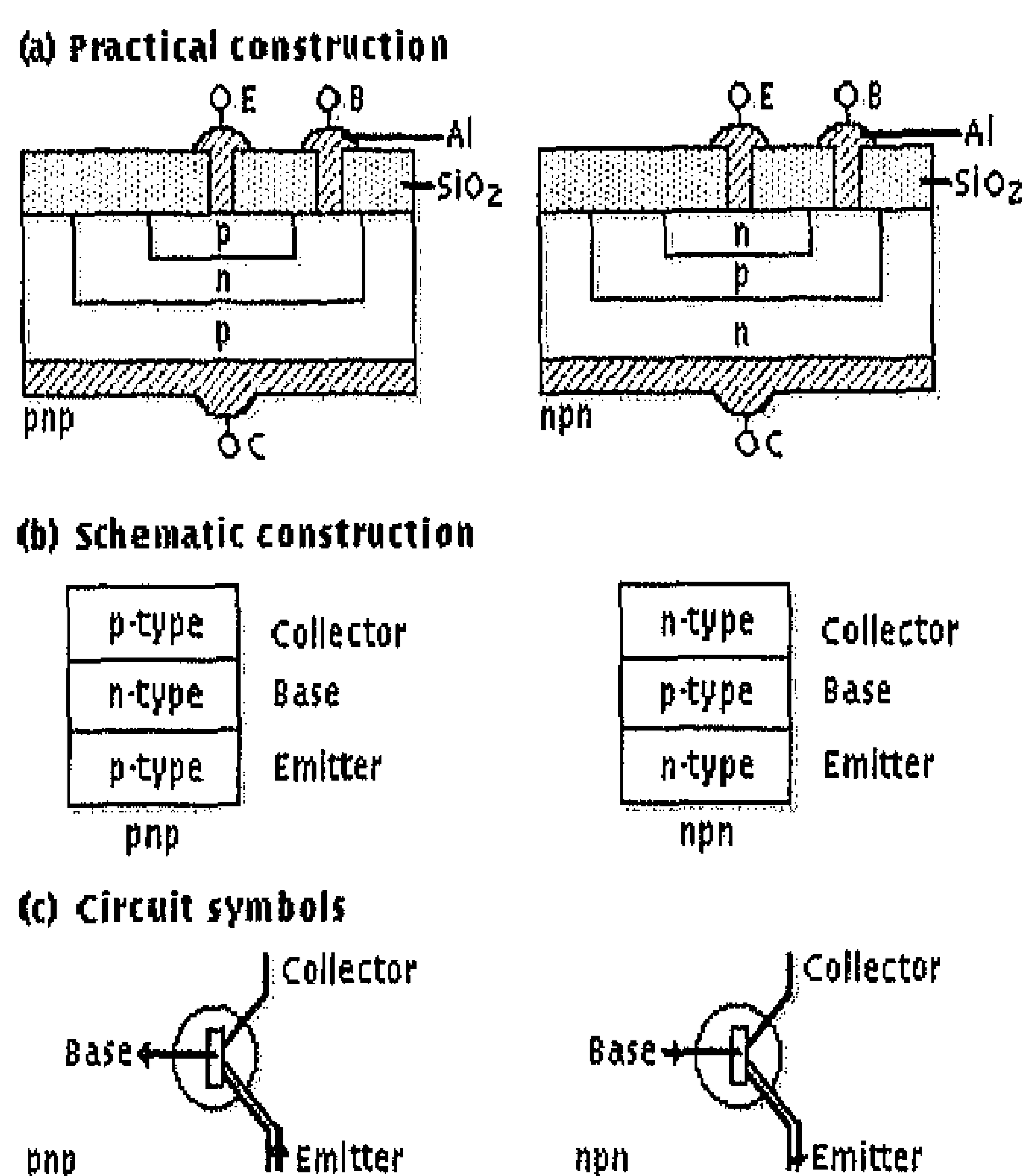
ترانزستورات الوصلة ثنائية القطبية (Bipolar Junction Transistors)

يتم تصنيع هذا النوع من الترانزستورات من خلال تطعيم ثلاث مناطق متجاورة على بلورة نقية من السيليكون بحيث يكون التطعيم إما على شكل (سالب_موجب_ سالب)(NPN) أو على شكل (موجب_سالب_موجب) (PNP). ويتم توصيل أقطاب معدنية بهذه المناطق الثلاثة حيث يسمى القطب الموصول بالمنطقة الوسطى بالقاعدة (Base) بينما تسمى الأقطاب الموصولة بالمنطقتين الخارجيتين بالباعث (Emitter) والمجمع (Collector). ويطلق على هذه النوع من الترانزستورات بالترانزستور ثنائي القطبية (bipolar) وذلك بسبب وجود وصلتين فيه وكذلك بسبب مساهمة الفجوات والإلكترونات في حمل التيار الذي يسري داخل الترانزستور. يتطلب عمل هذا النوع من الترانزستورات وجود وصلتين يكون في الغالب وضع الإنحياز لأحدهما أمامي وللأخرى عكسي مما يعني أن الوصلة المنحازة أماميا ستسمح بمرور التيار بينما لا تسمح الوصلة المنحازة عكسيا بمروره. ولكن إذا ما تم تصنيع الترانزستور بحيث يكون عرض منطقة القاعدة قليل جدا بحيث أن المنطقة المنضبة للوصلة المنحازة عكسيا تغطي معظم أجزائها فإن الإلكترونات أو الفجوات التي تصل إلى منطقة



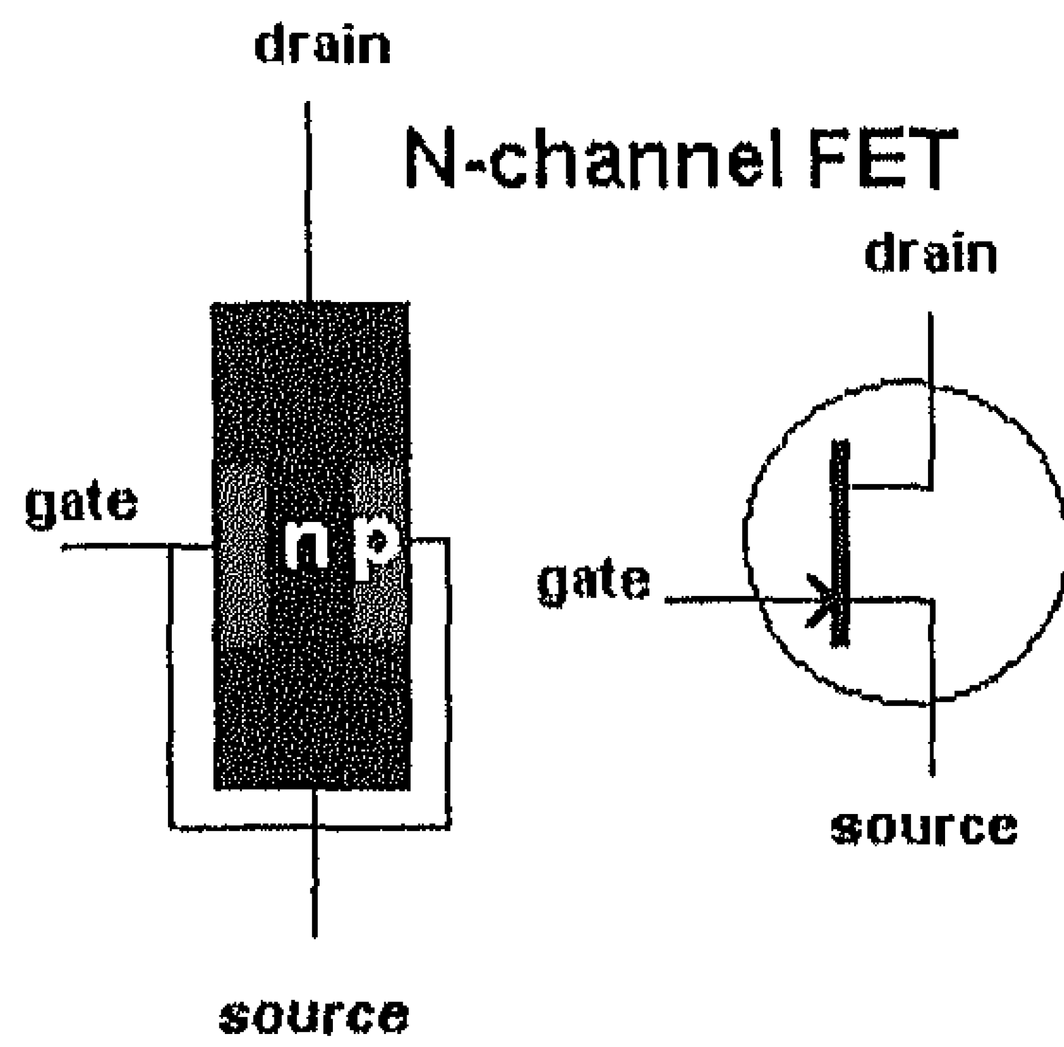
القاعدة من تيار الوصلة المنحازة أماميا سيقع في أسر المجال الكهربائي للمنطقة المنضبة المنحازة عكسيا وسيمر تيارا عاليا فيها رغم أنها منحازة عكسيا. وكلما قل عرض منطقة القاعدة كلما زادت نسبة عدد الإلكترونات أو الفجوات التي يتم اقتناصها من قبل الوصلة المنحازة عكسيا من العدد الكلي المتولد في الوصلة المنحازة أماميا. إن هذه الآلية في طريقة عمل الترانزستور تمكن تيارا ضعيفا يمر في القاعدة من التحكم بتيار قوي يمر بين الباعث والمجمع ويطلق على نسبة تيار المجمع أو الباعث على تيار القاعدة بكسب الترانزستور (transistor gain). ويمكن زيادة كسب الترانزستور من خلال تقليل عرض منطقة القاعدة ويمكن الحصول على كسب قد يصل لعدة مئات.

إن العيب الرئيسي للترانزستور ثنائي القطبية هو أن القاعدة تستخدم التيار الكهربائي للتحكم بعمل الترانزستور مما يستدعي استخدام دائرة كهربائية خارجية دقيقة لضبط قيمة تيار القاعدة والذي قد يؤدي أي انحراف في قيمته إلى تغيير مكان نقطة التشغيل التي يعمل عندها الترانزستور. إن الترانزستورات من نوع (NPN) أكثر شيوعا في الاستخدام من الترانزستورات من نوع (PNP) وذلك لاستجابتها العالية وذلك بسبب أن سرعة حركة الإلكترونات في المناطق السالبة أعلى بكثير من سرعة حركة الفجوات في المناطق الموجبة. ويتم تصنيع الترانزستور من نوع (NPN) بالطريقة السطحية من خلال تطعيم منطقة محددة بذارات مانحة لتنتج منطقة سالبة بعمق معين على سطح شذرة من السيليكون وفي داخل هذه المنطقة السالبة يتم تطعيم جزء منها بذرات مستقبلة لتحولها إلى منطقة موجبة وفي داخل هذه المنطقة الموجبة يتم تطعيم جزء منها بذرات مانحة لتحولها إلى منطقة سالبة وبهذا تتكون ثلاث مناطق منطقتين سالبتين بينهما منطقة موجبة ويتم وصل القاعدة بالمنطقة الموجبة والباعث بالمنطقة السالبة الأقرب من السطح والمجمع بالمنطقة السالبة الأبعد عن السطح. وبسبب أن مساحة وصلة الباعث أقل منها بكثير من مساحة وصلة المجمع في عملية التصنيع هذه فإن الكسب في تيار الباعث منه أكبر بكثير منه في حالة تيار المجمع ولذا يجب أن يراعى ذلك عند تصميم المضخمات فالترانزستور غير متماثل في مثل هذه الطريقة من التصنيع. ويتم تصنيع أنواع لا حصر لها من الترانزستورات بعضها يعمل عند الترددات المنخفضة وبعضها عند الترددات العالية وبعضها لأغراض القدرات المنخفضة وبعضها للقدرات العالية وذلك لتلبي حاجة التطبيقات المختلفة. ويحمل كل ترانزستور على سطحه رمزا مكون من عدد من الأحرف والأرقام ويمكن استخلاص بعض المعلومات من هذه الرموز كنوع مادة الترانزستور إن كانت من السيليكون أو الجرمانيوم أو كمدى الترددات التي يعمل عندها ومقدار الجهد أو التيار أو القدرة الكهربائية التي يتحملها.

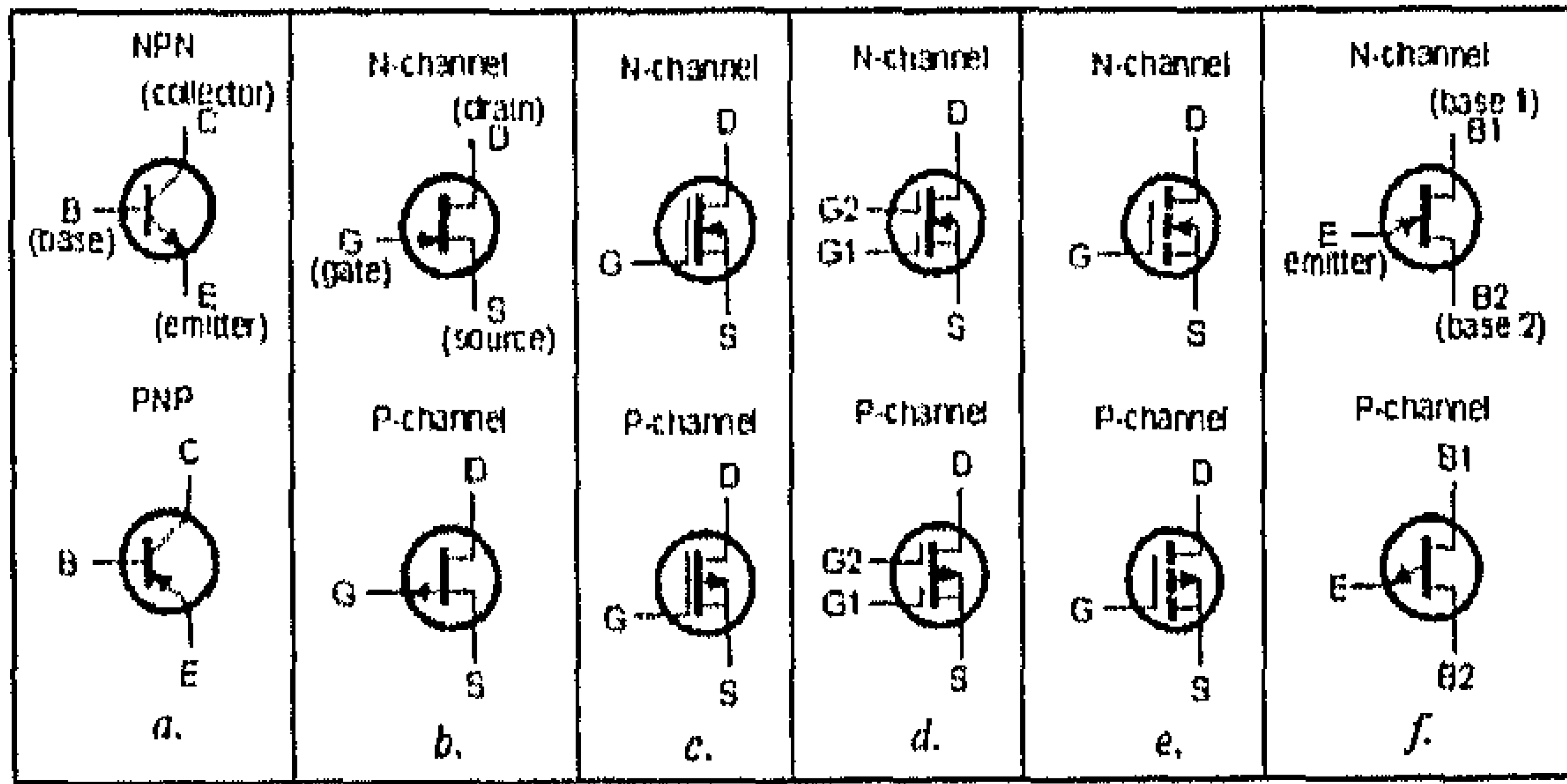


ترانزستورات تأثير المجال (Field Effect Transistors (FET))

تمكن في عام 1953م مهندسان من مختبرات بيل الأمريكية وهما أين روس (Ian Ross) وجـورج ديسي (George Dacey) من تصنيع ترانزستور يعمل بآلية تختلف عن تلك المستخدمة في الترانزسـتور ثنائي القطبية وهو ترانزسـتور تـأثير المجـال ذي الوصـلة (Junction Field Effect Transistors (FET)). ويتكون هذا الترانزستور من شريحة من السيليكون مطعمة إما كنوع سالب (N) أو كنوع موجب (P) ويوصل بطرفي هذه الشريحة قطبان معدنيان يسمى أحدهما المصدر (source) وهو ينـاظر الباعـث (emitter) ويسمى الآخر المصرف (drain) وهو يناظر المجمع (collector). ومن الواضـح أنـه عنـد تسليط جهد خارجي بين المصدر والمصرف فإن تيارا كهربائيا سيسري بين القطبين بغض النظر عن اتجـاه الجهد المسلط وذلك على العكس من الترانزستور ثنائي القطبية. ولكي يتم التحكم بمرور التيار بين القطبـين فإنه يتم تطعيم الشريحة على جانبيها وعند وسطها بنوع تطعيم مخالف لنوع التطعـيم الأساسـي للشـريحة ليتكون بذلك وصلتين حول الشريحة ويتم ربط الوصـلتين بقطب معدني يسمى البوابة (gate) وهو ينـاظر القاعـدة (base). ويطلق على منطقة الشـريحة المحصـورة بـين الوصلتين اسم القناة (channel) ويتحـدد عـرض القنـاة الفعلي الذي يمكن للتيار أن يمر من خلاله من عرض القناة الحقيقي مطروحا منه عرض المنطقتـين المنضـبتين فـي الوصلتين.

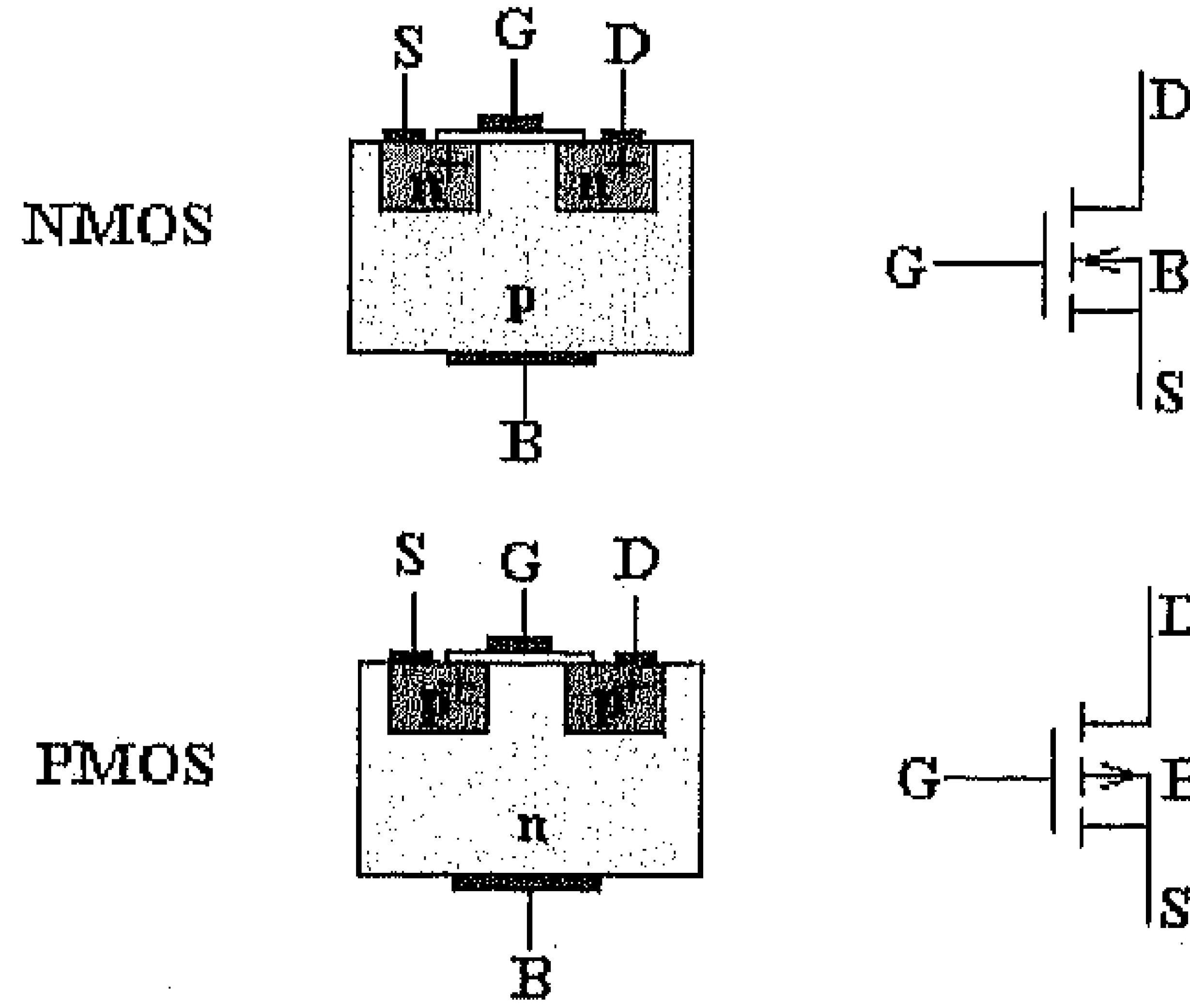


وعند تسليط جهد ذي انحياز عكسي بـين البوابـة وأحد القطبين الآخرين وغالبا قطب المصدر فإنـه يمكـن التحكم بعرض البوابة وبالتالي كمية التيار الذي يمر من خلالها. ومن الواضح أن عملية التحكم بالتيار المار بين المصدر والمصرف يتم من خلال الجهد الكهربائي بدلا من التيار الكهربائي كما في الترانزستور ثنـائي القطبية. ولذلك فقد أطلق العلماء على هذا النوع من الترانزستورات اسم ترانزستور تأثير المجـال وذلـك لأن المجال الكهربائي الناتج عن الجهد المسلط على البوابة هو المسؤول عـن عملية الـتحكم بمـرور التيـار فـي الترانزستور. إن التيار الذي يسري في القناة مكون من نوع واحد فقـط مـن حـاملات الشـحنات وهـي إمـا الإلكترونات في حالة القناة السـالبة أو الفجوات في حالة القناة الموجبة ولذا فقد تمت تسمية هـذا الترانزسـتور بالترانزسـتور أحـادي القطبيـة (unipolar) وذلك عل عكس الترانستور ثنائي القطبية الذي يستخدم النوعين من الحاملات في عمله.



وفي عام 1960م تمكن المهندسون في مختبرات بيل الأمريكية مـن تصـنيع أحـد أشـهر أنـواع الترانزستورات أحادية القطبية وهو النوع المسمى ترانزستور تأثير المجال من نـوع معـدن _ أكسـيد _ شـبه موصـل (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect transistor (MOSFET)). ويـتم

تصنيع هذه الترانزستورات بالطريقة السطحية من خلال إنتاج منطقة مطعمة تسمى القناة بأحد نوعي التطعيم السالب أو الموجب على سطح رقاقة من السيليكون ثم توضع طبقة من أكسيد السيليكون العازل تعلوها طبقة أخرى من المعدن كما يوحي بذلك أسمه. ويتم توصيل ثلاثة أقطاب معدنية أحدها إلى الطبقة المعدنية ويسمى البوابة بينما يوصل الطرفان الآخران إلى المنطقة شبه موصلة في مكانيين متقابلين حول البوابة يسميان المصدر والمصرف. ويسمى هذا النوع من الترانزستورات بترانزستور الموصفت المنضب ((Depletion MOSFET) حيث يلزم تسليط جهد بقطبية محددة على البوابة ليحول نوع المادة شبه الموصلة التي تقع تحتها من موجب إلى سالب أو العكس لكي يتم التحكم بمرور التيار بين المصدر والمصرف. وفي النوع المسمى الموصفت المعزز (Enhancement MOSFET) يتم تطعيم رقاقة السيليكون بمنطقتين منفصلتين من النوع السالب أو الموجب بينهما منطقة وسطى تطعم بنوع مغاير لتلك التي للمنطقتين المنفصلتين ثم توضع طبقة من أكسيد السيليكون العازل تعلوها طبقة أخرى من المعدن لتغطي المنطقة الوسطى ويتم توصيل ثلاثة أقطاب اثنان بالمنطقتين المنفصلتين وهما المصدر والمصرف والثالث بالطبقة المعدنية وهو البوابة. ويلزم تسليط جهد بقطبية محددة على البوابة ليحول نوع المادة شبه الموصلة التي تقع تحتها من موجب إلى سالب أو العكس لكي يتم التحكم بمرور التيار بين المصدر والمصرف. إن أهم ما يميز الترانزستور أحادي القطبية على ثنائي القطبية هو عدم حاجته لدائرة كهربائية معقدة لتحديد نقطة تشغيله وكذلك قلة استهلاكه للطاقة وصغر المساحة التي يحتلها على سطح البلورة الشبه موصلة ولكن عيبه الرئيسي هو أن سرعة تبديله أقل منها في الترانزستور ثنائي القطبية بسبب أن البوابة تعمل كمكثف يحتاج شحنها تفريغها زمن طويل نسبيا.



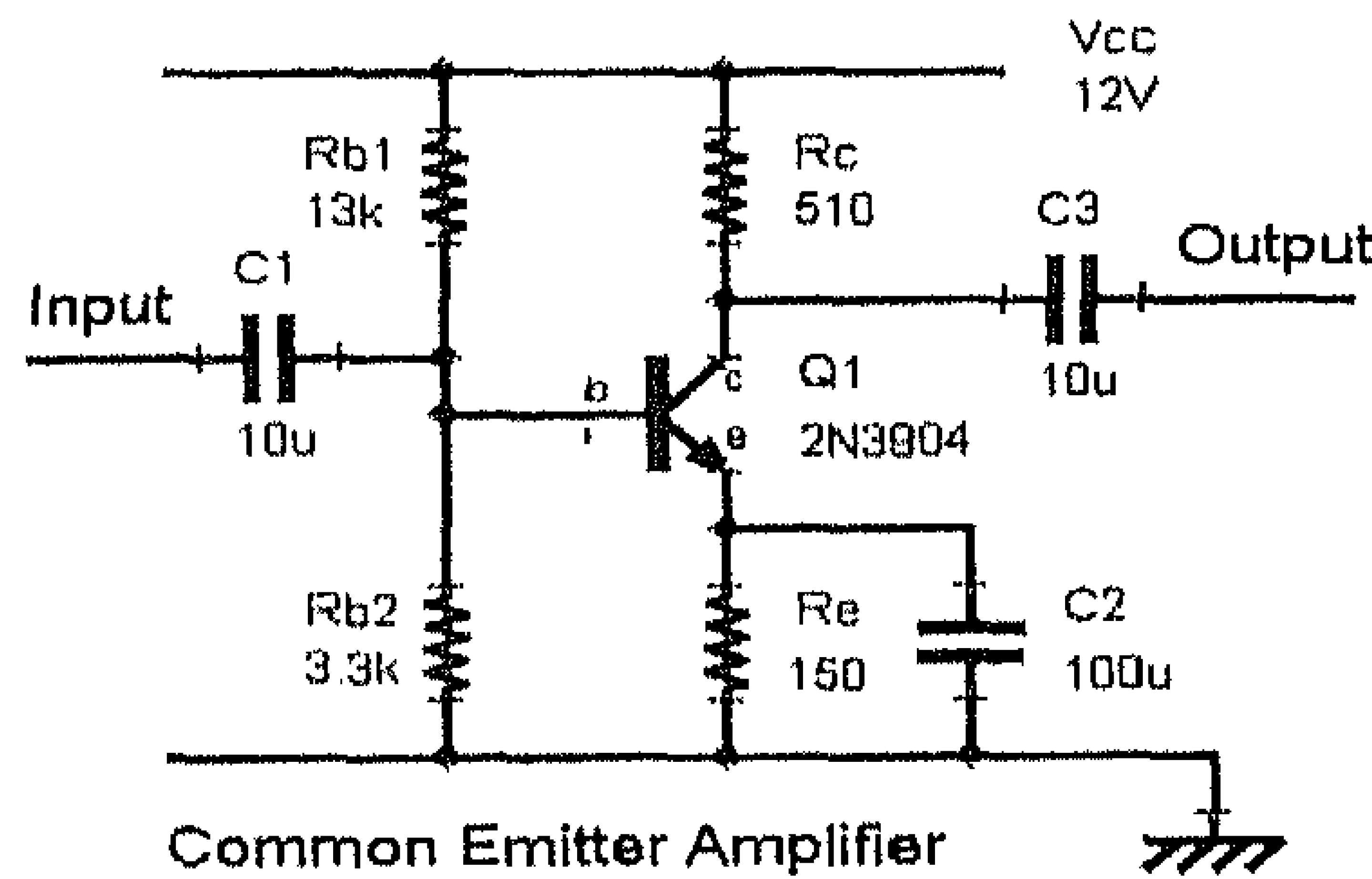
5-4 استخدامات الترانزستورات

لم يكن أحد يتوقع أن يقوم هذا الترانزستور البسيط بهذا الدور البالغ في حياة البشر وأن تظهر بسببه تطبيقات لم تكن لتخطر على بال مخترعيه ولا حتى على بال كتاب الخيال العلمي. إن الوظيفة الأساسية للترانزستور هي وظيفة في غاية البساطة وهي قدرته على التحكم بالتيار المار بين طرفين من أطرافه من خلال تيار أو جهد ضئيل جدا يتم تسليطه على الطرف الثالث. إن عملية التحكم بالتيار تتم بطريقتين اثنتين الأولى من خلال رفع أو خفض قيمة التيار تبعا لتيار أو جهد التحكم الصغير بحيث تكون العلاقة بينهما علاقة خطية وتسمى الدوائر الإلكترونية التي تعمل وفقا لهذه الطريقة بالدوائر الإلكترونية القياسية أو التشابهية (analog electronic circuits). وهذه الطريقة تستخدم لبناء دوائر إلكترونية تشابهية كالمضخمات (amplifiers) والمذبذبات (oscillators) والمازجات (mixers) والمعدلات (modulators) والمكاملات (integrators) والمفاضلات (differentiators) وغيرها. أما في الطريقة الثانية فإن تيار أو جهد التحكم

يقوم بوصل أو فصل التيار المار بين طرفي الترانزستور والذي يستخدم في هذه الحالة كمفتاح أو مبدل إلكتروني (electronic switch) وتسمى الدوائر الإلكترونية التي تعمل وفقا لهذه الطريقة بالدوائر الإلكترونية الرقمية (digital electronic circuits). وتستخدم هذه الطريقة لبناء دوائر إلكترونية منطقية كالدوائر المنطقية (logic circuits) والمسجلات (registers) والعدادات (counters) والنطاطات (flip-flops) والمردفات (multiplexors) وغيرها. وسنبين فيما يلي أن هذه الوظائف البسيطة للترانزستور قد تم استغلالها للقيام بوظائف أكثر تعقيدا وتم على أساسها تصنيع أجهزة ومعدات بالغة التعقيد تلعب دورا بالغ الأهمية في حياة الناس كأنظمة الاتصالات المختلفة وأنظمة البث الإذاعي والتلفزيوني والحواسيب وشبكات المعلومات وأنظمة التحكم والقياس وفي الأجهزة الطبية وغيرها الكثير.

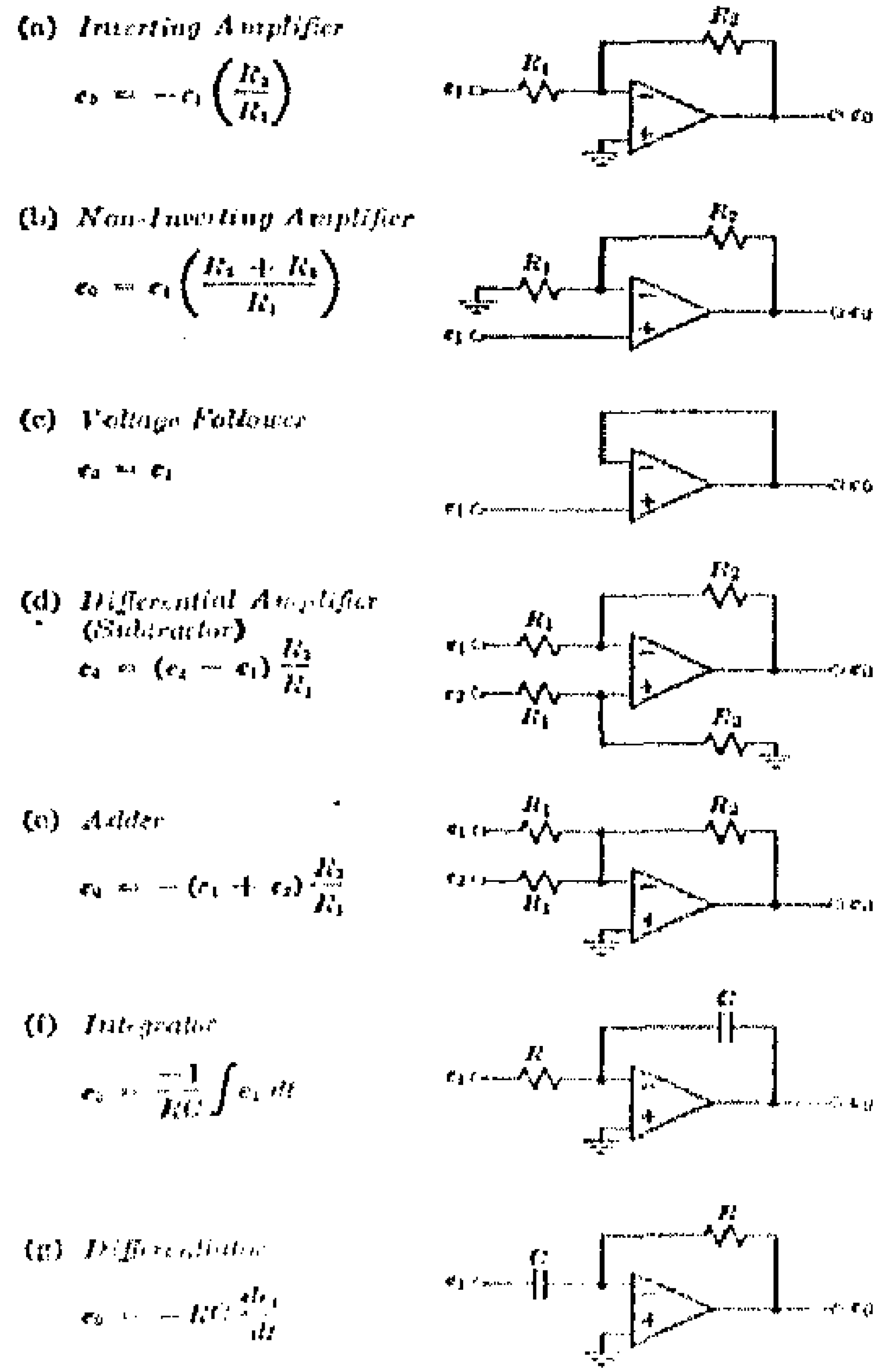
المضخمات (Amplifiers)

إن الاستخدام الرئيسي الذي من أجله تم اختراع الترانزستور في عام 1947م وسلفه الصمام الإلكتروني في عام 1906م هو لتضخيم الإشارات الكهربائية التي تصل إلى المستقبلات في أنظمة الاتصالات الكهربائية بشكل بالغ الضعف والتي قد تصل إلى ما دون النانوواط وهو جزء من ألف بليون جزء من الواط كما هو الحال في أنظمة اتصالات الأقمار الصناعية والمركبات الفضائية. والمضخم كما هو واضح من اسمه جهاز إلكتروني يقوم بتضخيم أو تكبير الإشارات الضعيفة ويعتمد في عمله على وظيفة الترانزستور الأساسية وهي أن تيارا أو جهدا ضعيفا يسلط على أحد أطرافه الثلاث يمكنه التحكم بتيار كبير يمر بين الطرفين الآخرين. إن الترانزستور لا يمكن أن يقوم بوظيفة التضخيم بمفرده بل يحتاج لوضعه في دائرة إلكترونية تحتوي على مكونات أخرى كالمقاومات والمكثفات والملفات تساعده للقيام بهذه الوظيفة وذلك بعد إمداد الدائرة الإلكترونية بالطاقة الكهربائية التي تشغلها. إن المضخم دائرة إلكترونية لها مدخل (input) ومخرج (output) وعادة ما يتم ربط أحد أطراف الترانزستور بدائرة المدخل والطرف الثاني بدائرة المخرج بينما يكون الطرف الثالث مشتركا بين الدائرتين. ولهذا فإن دوائر المضخمات تأتي على ثلاثة أشكال تسمى تبعا لاسم الطرف المشترك وهي في الترانزستورات ثنائية القطبية دوائر الباعث المشترك (common emitter) والمجمع المشترك (common collector) والقاعدة المشتركة (common base) بينما في الترانزستورات أحادية القطبية دوائر المصدر المشترك (common source) والمصرف المشترك (common drain) والبوابة المشتركة (common gate). إن مثل هذه الأشكال المختلفة للمضخمات تعطي مصممها الحرية في تحديد المواصفات التي يتطلبها التطبيق فبعض أشكال هذه المضخمات تضخم التيار ولا تضخم الجهد وبعضها يضخم الجهد ولا يضخم التيار وبعضها يضخم الجهد والتيار وبعضها له نطاق تمرير واسع للترددات وبعضها يبدي مقاومة عالية أو منخفضة في دوائر الدخل والخرج.



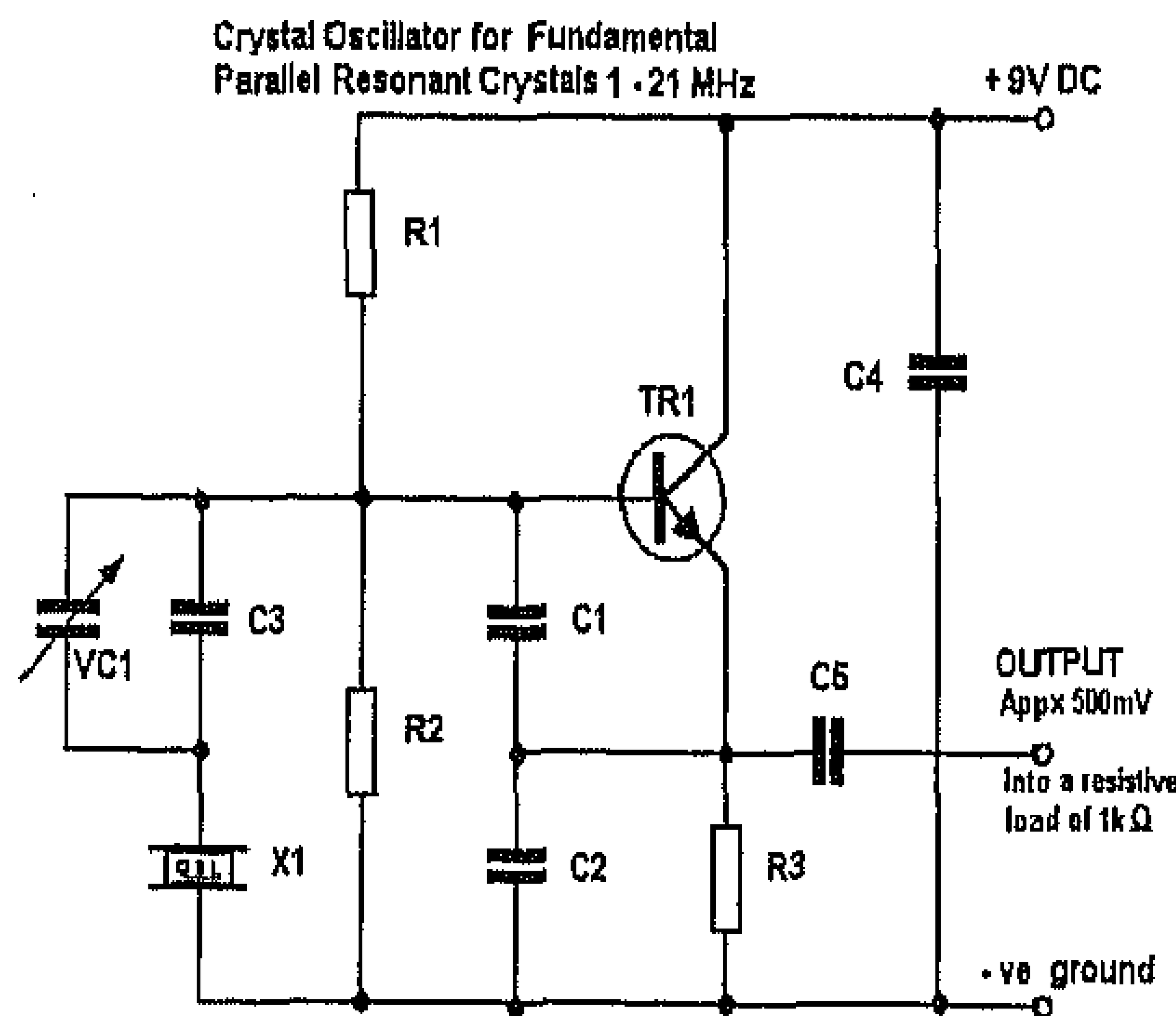
Common Emitter Amplifier

وتستخدم المضخمات في بناء دوائر تقوم بوظائف أخرى غير وظيفة تضخيم الإشارات ولكن وجود



المضخم في مثل هذه الدوائر ضروري لكي تقوم بوظيفتها على الوجه الأكمل. وعادة ما تتطلب هذا الدوائر وجود مضخم بمقدار كسب عالي جدا ولذلك فقد ظهر في الستينات ما يسمى بمضخم العمليات (operational amplifier) وهو مضخم مكون من عدة ترانزستورات على شكل مضخم تفاضلي (differential amplifier). ومضخم العمليات المثالي له كسب لا نهائي (infinite gain) ومعاوقة دخل لا نهائية (infinite input impedance) ومعاوقة خرج تساوي صفر (zero output impedance). ويستخدم مضخم العمليات في بناء دوائر إلكترونية تؤدي وظائف مهمة في معالجة الإشارات كمضخمات الجمع والطرح (summing and subtraction) والمكاملات والمفاضلات (integrators & differentiators) والمرشحات الفعالة بأنواعها المختلفة (active filters) والمقارنات وقادحات شميث (comparators and Schmitt triggers). إن صعوبة أو سهولة تصميم وتصنيع المضخمات بمختلف أنواعها يعتمد على موقع وعرض نطاق الترددات التي يضخمها وكذلك على مقدار الكسب في الجهد أو في التيار أو القدرة التي يجب أن يوفرها. ولهذا توجد أنواع لا حصر لها من المضخمات المستخدمة في مختلف التطبيقات كمضخمات القدرة (power amplifiers) والمضخمات واسعة النطاق (broadband amplifiers) والمضخمات المتولفة (tuned amplifiers).

المذبذبات (Oscillators)

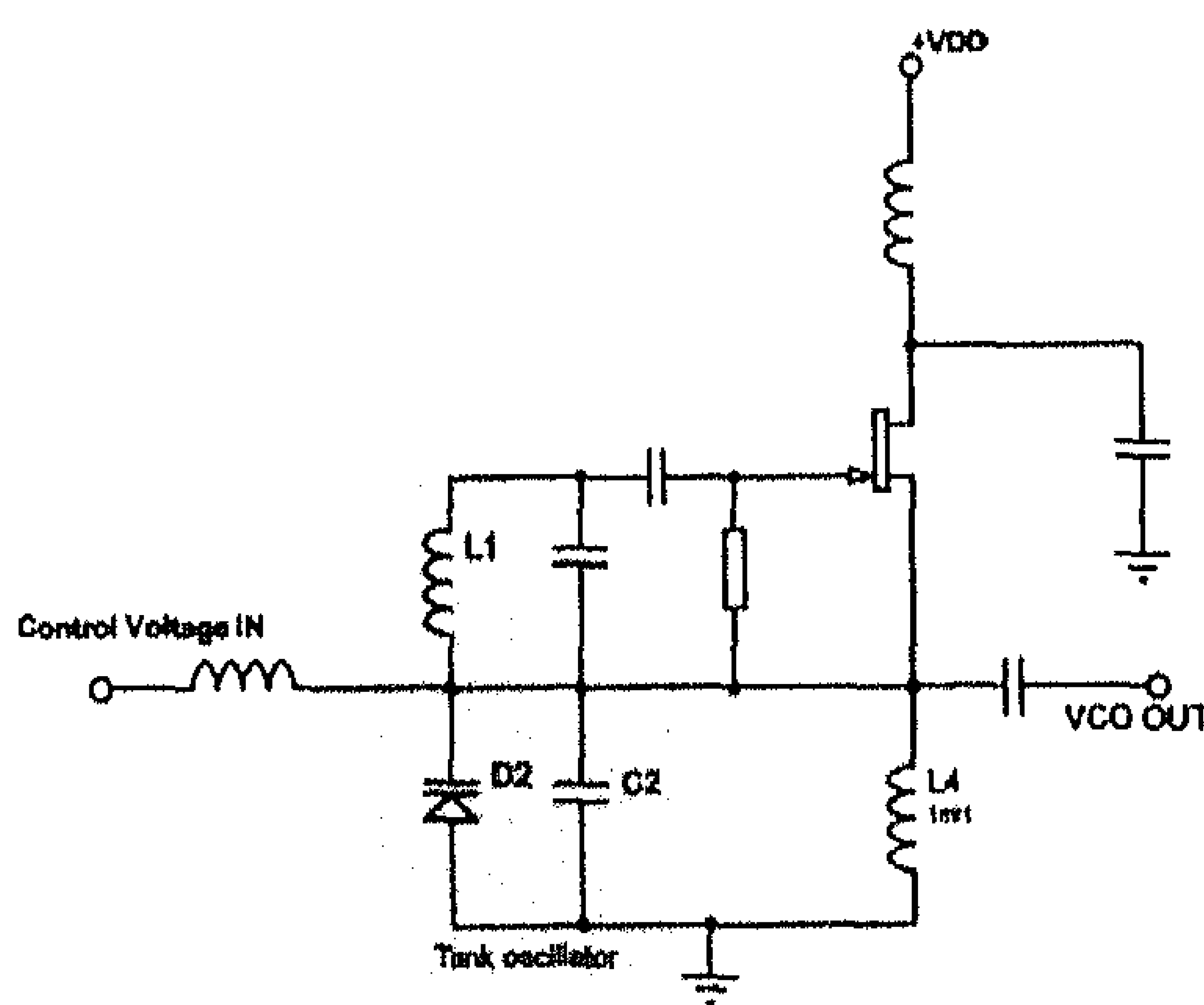


أما الاستخدام الآخر للترانزستور والذي لا يقل أهمية عن المضخمات فهو في دوائر المذبذبات التي تقوم بتوليد إشارات كهربائية جيبية (sinusoidal signals) أو غير جيبية وبترددات محددة أو متغيرة. والمذبذب هو عبارة عن مضخم يتم تغذية جزء من إشارة خرجه إلى دخله بما يسمى التغذية الراجعة (feedback) وإذا ما تحققت شروط معينة فإن المضخم يبدأ بتوليد إشارة متناوبة على خرجه بدون وجود إشارة خارجية على دخله. ويتم تحديد التردد للإشارة التي يولدها المذبذب باستخدام طرق عدة أهمها استخدام دوائر الرنين العادية (resonant circuits) المكونة من الملفات والمكثفات حيث تساوي قيمة التردد المتولد قيمة تردد الرنين إذا ما تحققت شروط التذبذب. ومن عيوب استخدام دوائر الرنين العادية في المذبذبات أن الترددات التي تولدها غير دقيقة بسبب عدم دقة قيم المكثفات والملفات المستخدمة فيها وكذلك تأثر قيمها بتغير درجة الحرارة وتغير مواصفات المواد

التي تدخل في تركيبها مع مرور الزمن.

وإذا ما تم استخدام البلورات (crystals) كدوائر رنين في هذه المذبذبات بدلا من دوائر الرنين العادية فإن تردد المذبذب يتحدد من تردد البلورة والذي له قيمة بالغة الدقة ويطلق على هذا النوع اسم المذبذبات البلورية (crystal oscillators). والبلورة هي عبارة عن شريحة رقيقة من مواد بلورية تمتلك الخاصية الكهروضغطية (piezoelectric effect) توضع بين لوحين معدنيين وتتصرف هذه البلورة عند وضعها في دائرة مذبذب كدائرة رنين يتحدد ترددها من سمك الشريحة. وتتوفر البلورات بترددات تبدأ بقيم أقل من الميغاهيرتز وقد تصل إلى ما يزيد عن مائة ميغاهيرتز ولا يكاد يخلو أي مذبذب من مثل هذه البلورات نظرا لدقتها العالية مما أنعكس إيجابيا على أداء الأنظمة التي تستخدمها وخاصة أنظمة الاتصالات. أما المذبذبات التي أحدثت ثورة في أنظمة الاتصالات الحديثة فهي المسماة المذبذبات المحكومة بالجهد (voltage-controlled oscillators (VCO)) ففي هذه المذبذبات يمكن التحكم بقيمة التردد من خلال جهد يسلط على ثنائي المكثف المتغير (varactor or varicap diode) والذي يتم وصله كجزء من دائرة الرنين العادية. لقد كانت الطريقة اليدوية هي الطريقة الوحيدة لتغيير تردد المذبذبات العادية وذلك من خلال تغيير مواسعة المكثف بطريقة ميكانيكية ولكن مع اختراع المذبذبات المحكومة بالجهد أصبح بالإمكان تغيير تردد المذبذب من خلال تغيير الجهد المسلط عليه بطرق آلية. ومع استخدام المذبذبات المحكومة بالجهد في مستقبلات أنظمة الاتصالات المختلفة أصبحت عملية اختيارالقنوات تتم يدويا من خلال كبس الأزرار عن قرب أو بالتحكم عن بعد أو تحت سيطرة المعالجات الدقيقة والحواسيب.

لقد ساعدت المذبذبات المحكومة بالجهد على ظهور دائرة بالغة الأهمية ألا وهي العروة مقفلة الطور (Phase-Locked Loop(PLL)) والتي تستخدم في مختلف المجالات وخاصة في مجال أنظمة الاتصالات والتحكم كما في دوائر التعديل والكشف (modulation & detection) وفي مركبات الذبذبات (frequency synthesizers). تستخدم المذبذبات بمختلف أنواعها في تطبيقات لا حصر لها ولكن استخدامها الأكثر في مجال أنظمة الاتصالات المختلفة حيث تستخدم عند المرسل كحاملات (carriers) لإشارات المعلومات وعند المستقبلات كمذبذبات محلية (local oscillators) تعمل على اختيار القنوات المراد استقبالها. وبما أن ترددات أنظمة الاتصالات تغطي جميع أجزاء الطيف الراديوي الذي يمتد من الصفر إلى ما يقرب من مائة ألف مليون هيرتز (مائة جيقاهيرتز) فإن ذلك يتطلب تصميم مذبذبات تلبي احتياجات مختلف أنواع أنظمة الاتصالات وهذا يتطلب توفر ترانزستورات قادرة على العمل عند مختلف أجزاء الطيف الراديوي.

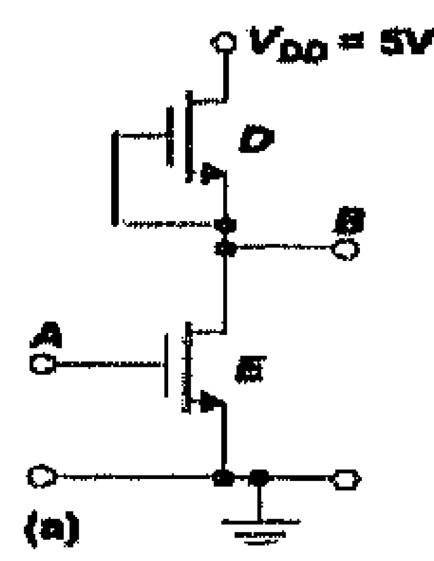


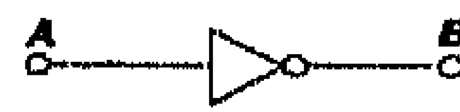
وتستخدم الترانزستورات في تطبيقات أخرى لا يمكن حصرها نذكر منها على سبيل المثال دوائر التعديل التي تقوم بتحميل إشارات المعلومات على الترددات الحاملة التي تولدها المذبذبات عند المرسل وفي دوائر الكشف التي تسترجع إشارات المعلومات من الحاملات عند المستقبل وفي دوائر الترشيح التي تقوم بانتقاء الإشارات الكهربائية المراد استقبالها من بين آلاف الإشارات التي تلتقطها هوائيات الاستقبال إلى جانب

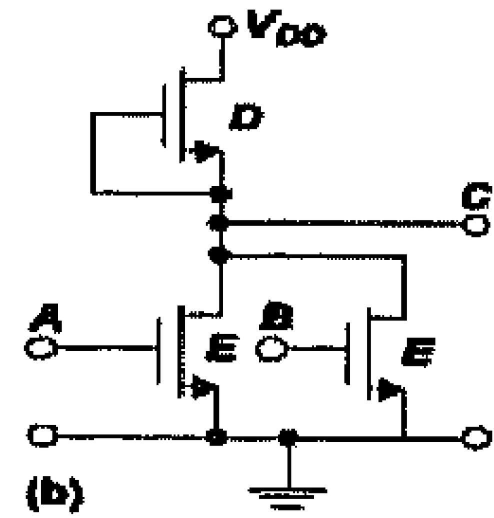
التقليل من أثر الضجيج والتداخل على هذه الإشارات. وتستخدم الترانزستورات في أنظمة القدرة الكهربائية لتحويل التيارات المترددة إلى تيارات مباشرة وكذلك العكس والتحكم كذلك بالآلات والمحركات الكهربائية. وتستخدم في المعدات الطبية لتوليد مختلف أنواع الإشارات الكهربائية والذبذبات الفوق صوتية وبعض أنواع الأشعة وكذلك دوائر الكشف الخاصة بها. وتستخدم في أنظمة القياس لتصنيع مختلف أنواع المجسات أو الحساسات التي تحول مختلف أنواع الكميات الفيزيائية كالضغط والشد والرطوبة ودرجة الحرارة وغيرها إلى إشارات كهربائية يسهل معالجتها وتخزينها باستخدام الدوائر الإلكترونية. وتستخدم كذلك في أنظمة التحكم لبناء معدات تحكم صغيرة الحجم وعالية الدقة لمختلف التطبيقات كالمصانع والمركبات والقطارات والطائرات ومحطات توليد الكهرباء بمختلف أنواعها.

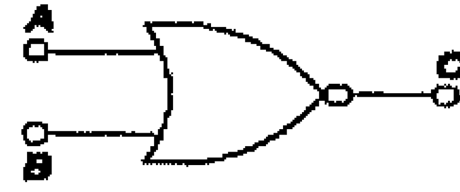
الإلكترونيات الرقمية (Digital Electronics)

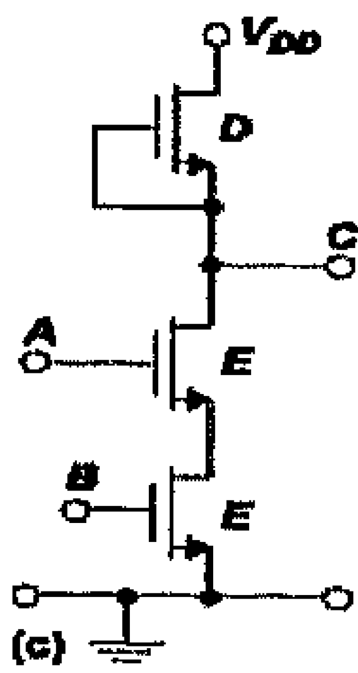
إن الاستخدام الأكثر أهمية الذي يقف وراء ما يسمى بثورة المعلومات فهو استخدام الترانزستور كمبدل أو مفتاح إلكتروني (electronic switch) يسمح أو لا يسمح بمرور التيار الكهربائي فيه وذلك من خلال تمرير تيار كهربائي ضئيل في قاعدة الترانزستور ثنائي القطبية أو من خلال تسليط جهد كهربائي على بوابة الترانزستور أحادي القطبية. لقد تم استخدام الترانزستور كمفتاح إلكتروني في بناء جميع الدوائر المنطقية الرقمية التي يحتاجها الحاسوب حيث أن هذه الدوائر المنطقية ما هي إلا مجموعة من المفاتيح الموصولة على التوالي أو على التوازي وعند القيام بفتحها وإغلاقها نحصل على العمليات المنطقية التي يعمل على أساسها الحاسوب الرقمي. ومع التحول إلى استخدام التقنية الرقمية في أنظمة الاتصالات الكهربائية في الستينات بدأت صناعة الإلكترونيات الرقمية تزدهر وتخدم أنظمة الحواسيب وأنظمة الاتصالات على حد سواء حيث أن الدوائر المنطقية الرقمية هي التي تقوم بمعالجة جميع أنواع الإشارات الرقمية بغض النظر عن مصدرها.

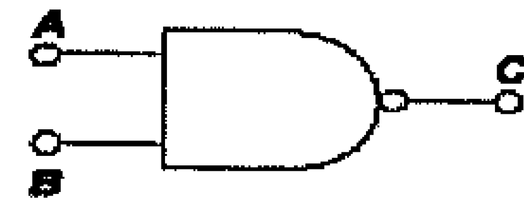












وتتعامل الدوائر الإلكترونية الرقمية مع عدد محدد من مستويات الجهد بدلا من العدد اللامتناهي في الدوائر العادية أو ما يطلق عليها الدوائر القياسية أو التشابهية (Analog Circuits). وغالبا ما تستخدم الدوائر الرقمية مستويين اثنين فقط من الجهد أو التيار وتسمى مثل هذه الدوائر بالدوائر الرقمية الثنائية. إن أهم ما يميز الدوائر الرقمية الثنائية هو سهولة تصميمها وتصنيعها لكونها تتعامل مع مستويين اثنين فقط من الجهد ومقاومتها العالية لإشارات الضجيج المتولدة في داخل هذه الدوائر وكذلك إمكانية ربط عدد كبير من المراحل على التوالي دون أن تتشوه الإشارة الرقمية خلال انتقالها عبر هذه المراحل. وهنالك ميزة أخرى بالغة الأهمية لمصممي الأنظمة الرقمية وهي إمكانية بناء أنظمتهم مهما بلغ تعقيدها ومهما كان الغرض الذي

صممت من أجله من وحدات منطقية رقمية أساسية كالبوابات المنطقية والمسجلات والعدادات والنطاطات والموقتات. ولذلك فقد قامت الشركات المصنعة للدوائر المتكاملة الرقمية بإنتاج كميات ضخمة من هذه القطع الإلكترونية الرقمية يتم استهلاكها من قبل أسواق تصنيع مختلف أنواع الأجهزة والمعدات الرقمية في مختلف الصناعات الإلكترونية.

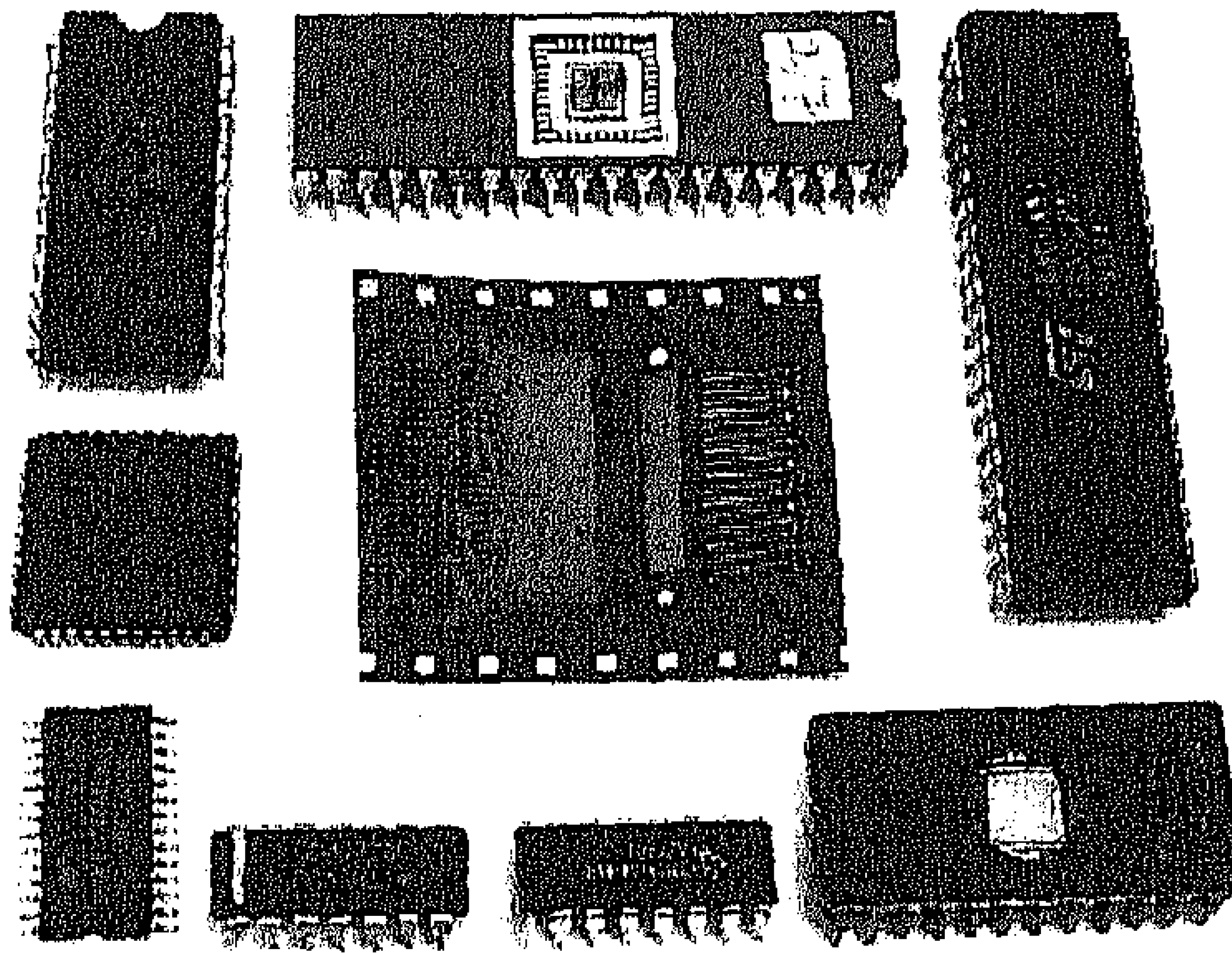
يتم تصنيع الدوائر الإلكترونية الرقمية باستخدام تقنيتين رئيسيتين وهما تقنية الترانزستور ثنائي القطبية وتقنية الترانزستور أحادي القطبية. وتتكون تقنية الترانزستور ثنائي القطبية بدورها من عدة عائلات وذلك لأن سرعة التبديل وكمية الطاقة المستهلكة والحيز التي تحتله الدائرة على الرقاقة لا يعتمد فقط على نوع الترانزستور بل على الطريقة التي يتم بها وصل الترانزستورات مع بقية العناصر الإلكترونية. ففي مطلع الستينات ظهرت أول العائلات المنطقية وهي ما يسمى بمنطق الترانزستور-المقاومة (-Resistor Transistor Logic (RTL)) حيث تبنى الدوائر المنطقية من الترانزستورات والمقاومات فقط. وبسبب انخفاض سرعة التبديل في هذه العائلة فقد تم تعديلها بعد عام واحد من خلال إضافة الثنائيات إلى دوائرها والتقليل من عدد المقاومات وأطلق على الدائرة الناتجة اسم منطق الترانزستور- الثنائي (-Diode Transistor Logic (DTL)). وفي عام 1963م ظهرت العائلة المنطقية الشهيرة المسماة منطق الترانزستور- الترانزستور ((Transistor-Transistor Logic (TTL)) حيث تغلبت على المشاكل التي كانت تعاني منها العائلات التي سبقتها ولا زالت من أهم العائلات المنطقية المستخدمة إلى يومنا هذا. وفي نهاية الستينات ظهرت عائلتان جديدتان وهما عائلة منطق البواعث المقترنة(Emitter-Coupled Logic) (ECL) وعائلة منطق الحقن المتكامل (Integrated Injection Logic) واللتان تتميزان بأعلى سرعة تبديل ممكنة من بين جميع العائلات المنطقية إلا أنهما في المقابل تستهلكان كميات عالية من الطاقة ولذلك فقد اقتصر استخدامهما في التطبيقات التي تحتاج لسرعات تبديل عالية جدا. وبشكل عام تتميز تقنية الترانزستور ثنائي القطبية بسرعة تبديل عالية نسبيا إلا أن عيبها يكمن في أنها تستهلك طاقة كهربائية عالية نسبيا وأن عدد الترانزستورات المصنعة على وحدة المساحة (كثافة التكامل) قليل نسبيا ولذلك فقد اقتصر استخدامها في الدوائر المتكاملة ذات النطاق المتوسط والكبير وبعض أجزاء أنظمة الاتصالات الرقمية.

أما التقنية الثانية فهي تقنية الترانزستور أحادي القطبية والتي ظهرت في عام 1968م وتمتاز هذه التقنية بسهولة تصنيعها وقلة استهلاكها للطاقة وارتفاع عدد الترانزستورات المصنعة على وحدة المساحة ولكن سرعة التبديل فيها أقل من تلك التي في تقنية الترانزستور ثنائي القطبية. وتستخدم هذه التقنية في جميع أنواع الدوائر المتكاملة وخاصة ذات النطاق الكبير جدا (VLSI) وما فوقها والتي تتناسب مع صناعة المعالجات الدقيقة وذاكرات الحاسوب. وتشتمل هذه التقنية على ثلاث عائلات وهي عائلة ترانزستور معدن- اكسيد- شبه موصل – موجب القناة P-channel Semiconductor Field-Effect Transistor (PMOSFET)) وعائلة ترانزستور معدن-اكسيد- شبه موصل – سالب القناة N-channel Semiconductor Field-Effect Transistor (NMOSFET)) وعائلة ترانزستور معدن-اكسيد- شبه موصل -مكمل (Complementary Semiconductor Field-Effect Transistor (CMOSFET)).

وفي بداية التسعينات ظهرت تقنية جديدة تجمع بين ميزات تقنية الترانزستور ثنائي القطبية ذات سرعة التبديل العالية وتقنية الترانزستور أحادي القطبية ذات كثافة التكامل العالية بعد أن أصبح بالإمكان تصنيع نوعي الترانزستور على نفس شريحة السيليكون ولقد تم استخدام هذه التقنية المسماة (BiCMOS) في تصنيع المعالجات الدقيقة ذات السرعات العالية. ولا تقتصر الإلكترونيات الرقمية على بناء دوائر المنطق الرقمي بل

تتعامل مع أنواع مختلفة من الدوائر الرقمية فالمهتزات أحادية الاستقرار وغير المستقرة (monostable and astable multivibrators) تستخدم في الموقتات (clocks) ودوائر التوقيت (timing circuits) لجميع الأنظمة الرقمية والتي لا يمكن أن تعمل بدونها. وتستعمل المهتزات ثنائية الاستقرار (bistable multivibrators) لبناء أنواع كثيرة من النطاطات (flip-flops) والتي تستخدم بدورها في دوائر رقمية كثيرة كالعدادات (counters) والمسجلات (registers) والذاكرات (memories). وتستعمل المضخمات التفاضلية ومضخمات العمليات لبناء المقارنات (comparators) وقادحات شميت (Schmitt triggers) ومولدات الأشكال الموجية (waveform generators). وتعمل المحولات التشابهية-الرقمية والرقمية-التشابهية (analog-digital & digital-analog converters) على تحويل الإشارات التشابهية إلى إشارات رقمية وبالعكس وتعتبر هذه المحولات جزءا أساسيا من الأنظمة الإلكترونية الحديثة وذلك بسبب أن جميع هذه الأنظمة تحولت إلى التقنية الرقمية بسبب ميزاتها الكثيرة ولذلك يلزم وجود مثل هذه المحولات لربط العالم التشابهي مع العالم الرقمي.

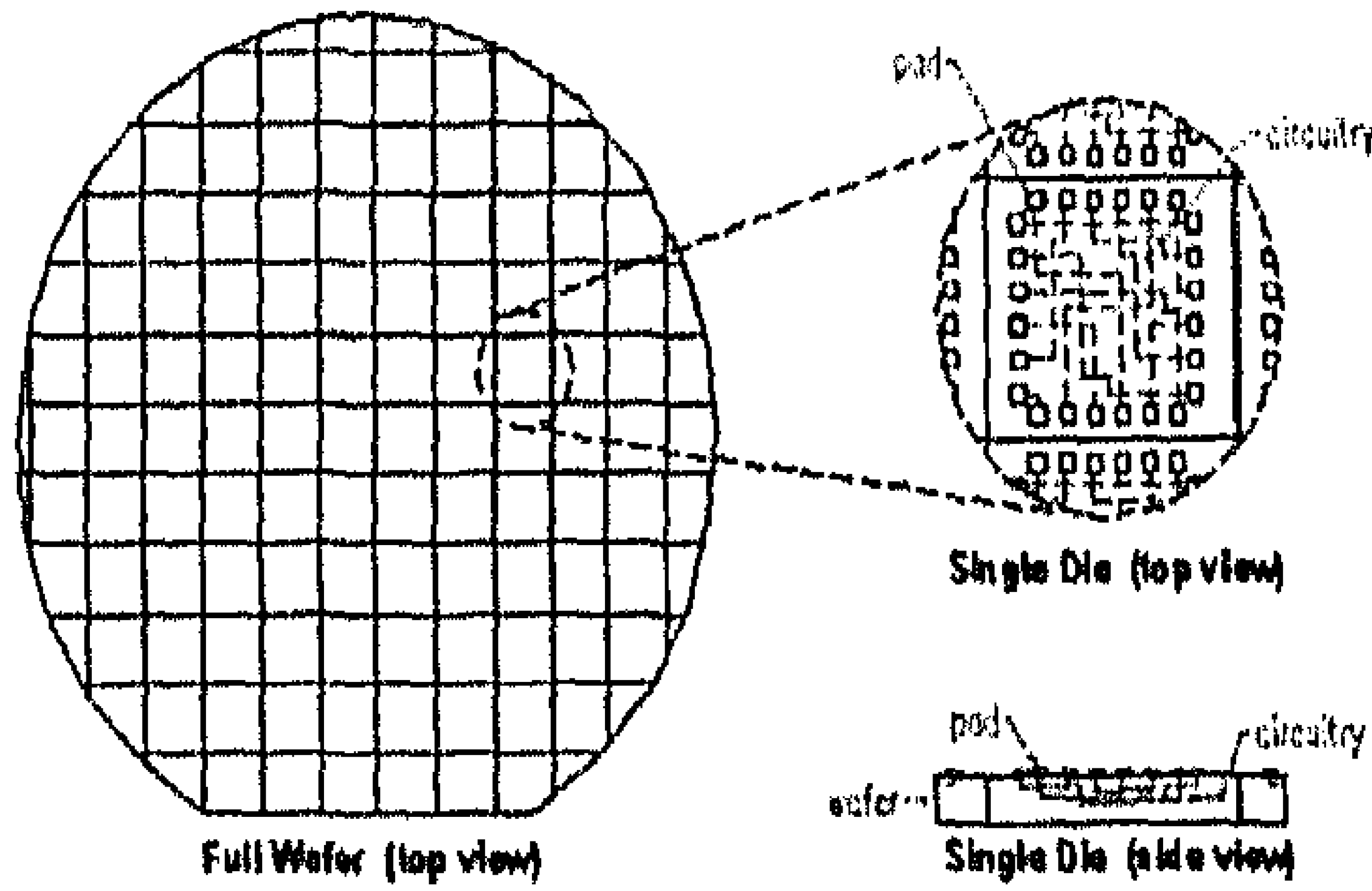
6-4 الدوائر المتكاملة (Integrated Circuits)



على الرغم من الدور الكبير الذي لعبه الترانزستور في تقليص أحجام الأجهزة الإلكترونية إلا أن أسلاك التوصيل بين الترانزستورات وبقية القطع الإلكترونية أصبحت هي العائق الرئيسي الذي يحول دون تصنيع أجهزة إلكترونية متطورة صغيرة الحجم تحتوي على أعداد كبيرة من الترانزستورات كالحواسيب والتلفزيونات الملونة والهواتف المتنقلة. فهذه الأسلاك أصبحت تحتل حيزا يزيد بكثير عن الحيز الذي تحتله الترانزستورات نفسها هذا إلى جانب أن التداخل الكهربائي بين الإشارات التي تحملها هذه الأسلاك والتأخير الزمني الذي تواجهه هذه الإشارات حد بشكل كبير من سرعة معالجة الإشارات التي تقوم بها الدوائر الإلكترونية. ولقد تم التغلب على مشكلة أسلاك التوصيل هذه بعد أن تمكن المهندسون في نهاية الخمسينات من اكتشاف طريقة جديدة لتصنيع الترانزستورات وهي الطريقة السطحية حيث يمكن تطعيم مناطق الترانزستور المختلفة على سطح رقاقة السيليكون بدلا من تطعيم كامل جسمها وكذلك تمكنهم من تصنيع المقاومات والمكثفات من نفس المواد شبه الموصلة التي يصنع منها الترانزستور. وبهذا فقد أصبح من الممكن تصنيع عدد كبير من الترانزستورات وما يلزمها من المقاومات والمكثفات في مناطق متجاورة على سطح الرقاقة ومن ثم يتم توصيلها ببعضها البعض بشرائط معدنية رقيقة يتم ترسيبها على سطح الرقاقة. وقد أطلق المهندسون على هذا الناتج اسم الدائرة المتكاملة حيث أنه تحتوي على دائرة إلكترونية بكامل مكوناتها من ترانزستورات ومكثفات ومقاومات. ففي عام 1958م تمكن مهندس في شركة تكساس للأجهزة في الولايات

المتحدة الامريكية من تصنيع أول دائرة متكاملة بسيطة على رقاقة من السيليكون حيث لم يتجاوز عدد الترانزستورات فيها العشرة.

وقد أطلق المهندسون على الدوائر المتكاملة التي تحتوي على أقل من مائة ترانزستور اسم الدوائر المتكاملة ذات النطاق الصغير ((Small Scale IC (SSI)). ومن ذلك الحين بدأت الشركات المصنعة لهذه الدوائر المتكاملة بالتنافس لزيادة عدد الترانزستورات على الرقاقة الواحدة بعد أن ارتبط التقدم في صناعة أجهزة الحواسيب وأجهزة الاتصالات الرقمية بما تنتجه هذه الشركات من دوائر متكاملة. وفي عام 1961م تنبأ أحد العاملين في مجال تطوير الدوائر المتكاملة وهو المهندس مور والذي قام في عام 1966م بتأسيس شركة إنتل التي تعتبر من أكبر شركات إنتاج الدوائر المتكاملة في الولايات المتحدة الأمريكية بأن عدد الترانزستورات على الرقاقة الواحدة سيتضاعف كل ثمانية عشر شهرا. ولقد صدقت توقعاته إلى حد كبير فقد ظهر في منتصف الستينات جيل الدوائر المتكاملة ذات النطاق المتوسط((Medium Scale IC (MSI)) (ما بين مائة ترانزستور وألف ترانزستور) وفي بداية السبعينات ظهر جيل الدوائر المتكاملة ذات النطاق الكبير ((Large Scale IC (LSI)) (ما بين ألف وعشرة آلاف ترانزستور). وفي بداية الثمانينات ظهر جيل الدوائر المتكاملة ذات النطاق الكبير جدا ((Very Large Scale IC (VLSI)) (ما بين عشرة آلاف ومائة ألف ترانزستور) وفي نهاية الثمانينات ظهر جيل الدوائر المتكاملة ذات النطاق فوق الكبير (Ultra Large Scale IC (ULSI)) (ما بين مائة ألف ومليون ترانزستور) وفي بداية التسعينات ظهر جيل الدوائر المتكاملة ذات النطاق فائق الكبر ((Extremely large Scale IC (ELSI)) حيث تجاوز عدد الترانزستورات المليون ترانزستور. وتتوفر الآن في الأسواق دوائر متكاملة تحتوي على ما يزيد عن عشرة ملايين ترانزستور مع ما يتبعها من مقاومات ومكثفات.



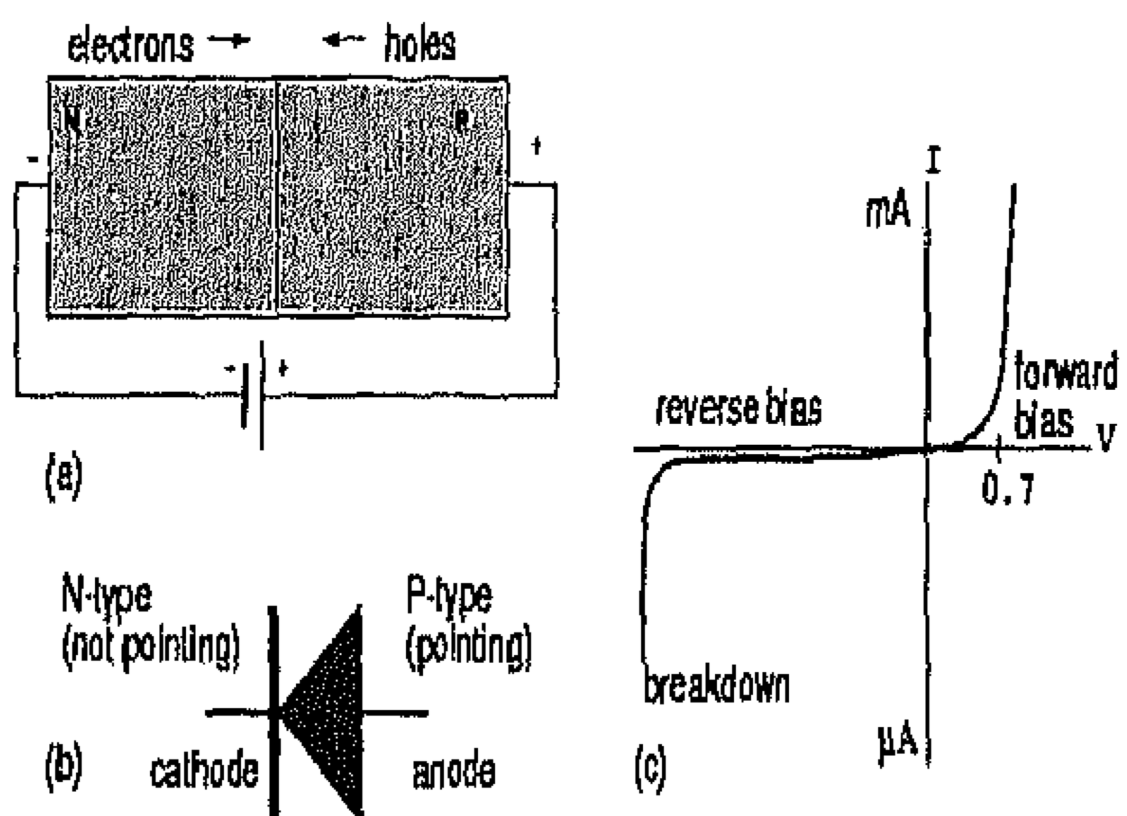
وتعتبر تقنية تصنيع الدوائر المتكاملة وخاصة الكبيرة منها من أكثر تقنيات التصنيع تعقيدا حيث تحتاج إلى معدات بالغة التعقيد وباهظة الثمن ولذلك فقد اقتصرت هذه التقنية على عدد قليل من الشركات الكبرى الموجودة في الولايات المتحدة الأمريكية وأوروبا الغربية واليابان. إن تصنيع عدة ملايين من الترانزستورات على سطح رقاقة من السليكون لا تتجاوز مساحتها عدة سنتيمترات مربعة مهمة ليست بالسهلة إذا ما عرفنا أن تعطل ترانزستور واحد فقط أو انقطاع أحد خطوط التوصيل بينها كفيل بتعطل كامل الدائرة المتكاملة ولا سبيل لإصلاحها بأي شكل من الأشكال. وتبدأ عملية تصنيع الدوائر المتكاملة بعملية إنتاج عنصر السيليكون من أكسيد السيليكون المتوفر بكثرة في رمال الصحراء وبدرجة نقاء تصل إلى 99,9999999 بالمائة ومن ثم يتم إذابة هذا السيليكون ليتم تصنيع بلورة سيليكون كبيرة الحجم. ويتم إنتاج هذه البلورة من خلال غمس بذرة بلورية في السيليكون المذاب ومن ثم يتم سحبها وتدويرها بشكل تدريجي تحت سيطرة معدات بالغة الدقة ليكون الناتج بلورة على شكل قضيب أسطواني يتراوح قطره ما بين خمسة سنتيمترات وعشرين سنتيمتر وبطول قد يصل إلى المتر. ويجب أن تتم هذه العملية في جو في غاية النظافة لتجنب دخول ذرات الغبار في هذه

البلورات النقية. أما العملية التالية فهي عملية تقطيع القضيب البلوري إلى شرائح دائرية كشرائح البطاطا بسمك لا يتجاوز عشر المليمتر ومن ثم يتم صقل أحد أوجه هذه الشرائح بشكل جيد. وبما أن مساحة الشريحة تتراوح ما بين مائة وألف سنتيمتر مربع بينما لا تتجاوز مساحة الدوائر المتكاملة عدة سنتيمترات مربعة فإنه يلزم تصنيع أعداد كبيرة من الدوائر المتكاملة جملة واحدة على سطح هذه الشريحة قبل أن يتم تقطيعها إلى قطع صغيرة تسمى الرقاقات يحتوي كل منها على دائرة متكاملة واحدة. أما العملية الأكثر تعقيدا فهي عملية تصنيع الدائرة المتكاملة على سطح الرقاقة والتي لا تتجاوز مساحتها عدة سنتيمترات مربعة حيث تتم هذه العملية على مراحل متعددة قد يصل عددها إلى مائة مرحلة في تقنيات التصنيع الحالية.

وتبدأ العملية بتصميم الدائرة المتكاملة المراد تصنيعها التي قد تحتوى على ملايين الترانزستورات ولا يمكن أن تتم هذه المرحلة إلا بمساعدة حواسيب ذات قدرات عالية ومن ثم تقوم برمجيات حاسوبية خاصة بإجراء محاكاة لهذه الدائرة الإلكترونية لكي يضمن المصممون أنها تعمل بالشكل المطلوب قبل تصنيعها حيث لا مجال لإصلاح الأخطاء بعد أن تتم عملية التصنيع. أما الخطوة التالية فهي عملية طبع الدائرة الإلكترونية على أفلام شفافة كبيرة حيث تظهر هذه الدائرة على شكل خطوط متشابكة يمكن مشاهدة تفاصيلها بالعين المجردة ومن ثم يتم طباعة الدائرة المتكاملة على طبقة رقيقة جدا من مادة حساسة للضوء يتم ترسيبها على سطح رقاقة السيليكون ولكن بعد تصغيرها آلاف المرات باستخدام سلسلة من العدسات الضوئية بحيث لا يتجاوز عرض الخط الواحد على سطح الرقاقة الميكرومتر الواحد. ويتم إزالة الطبقة الحساسة للضوء التي انطبعت عليها خطوط الدائرة الإلكترونية باستخدام المواد الكيميائية والإبقاء على الطبقة في المناطق التي لا تحتوي على خطوط. ومن ثم تبدأ عملية تطعيم مناطق السيليكون المكشوفة والتي كانت تقع تحت هذه الخطوط وذلك لتصنيع الترانزستورات وبقية العناصر الإلكترونية. وبعد ذلك يتم طبع التوصيلات التي تربط الترانزستورات ببعضها بنفس الطريقة السابقة حيث يتم ترسيب طبقة معدنية رقيقة حيث توجد خطوط التوصيل. وبعد الانتهاء من عملية تصنيع الدوائر الإلكترونية على الرقاقات يتم فحصها جميعا بأجهزة إلكترونية لاستبعاد الرقاقات المعطوبة ومن ثم يتم تقطيع الشريحة إلى رقاقات صغيرة يحتوي كل منها على دائرة متكاملة صالحة. ومن ثم يتم وصل الوصلات المعدنية الخارجية للرقاقات الصالحة ويتم تغليفها في كبسولات خزفية أو بلاستيكية محكمة الإغلاق لتكون جاهزة للاستخدام.

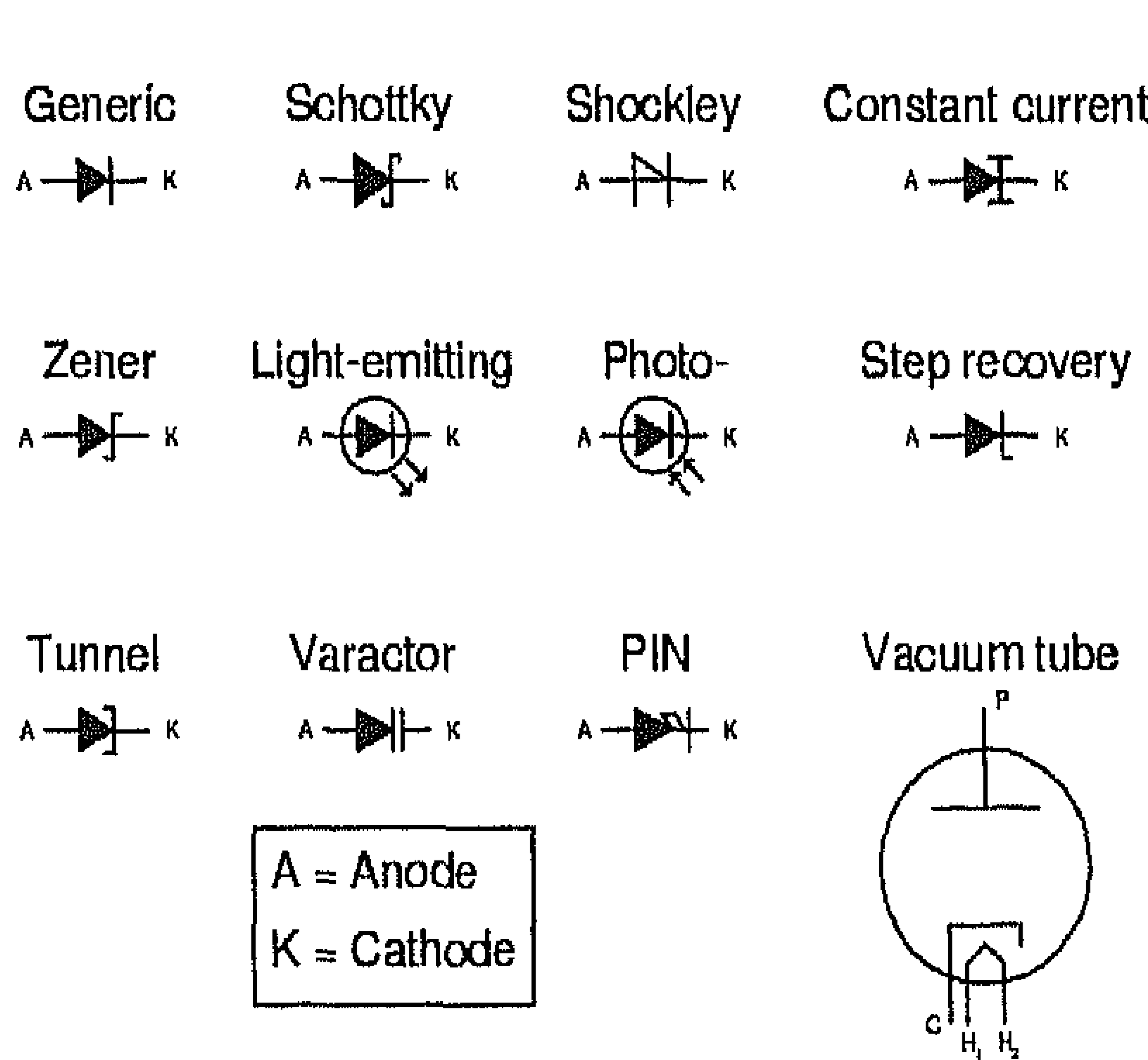
7-4 الثنائيات (Diodes)

الثنائي هو عبارة عن وصلة موجب-سالب (PN junction) مبنية بحيث تكون كلتا منطقتيها إما من مادة شبه موصلة وإما أن تكون إحداهما من معدن والأخرى من مادة شبه موصلة. إن الخاصية الأساسية في جميع أنواع الثنائيات هي أنها تسمح بمرور التيار من خلالها باتجاه واحد فقط وذلك عند تسليط جهد بانحياز أمامي على طرفيها ولا تسمح بمرور التيار في حالة الانحياز العكسي. ويسمى القطب المعدني الموصول بالمنطقة الموجبة بالمصعد (Anode) والقطب المتصل بالمنطقة السالبة بالمهبط (Cathode). ومن خلال التحكم بأبعاد وأنواع المواد التي تصنع منها الثنائيات وكذلك كمية ونوعية المواد



المطعمة يمكن إنتاج أنواع مختلفة من هذه الثنائيات بمواصفات مختلفة لكي تقوم بمهام مختلفة في الدوائر الإلكترونية. فهناك الثنائيات التي تتحمل تيارات أو جهود عالية أو التي لها سرعات تبديل عالية أو التي تنهار عند جهد محدد دون أن تعطب والتي تظهر بعض الظواهر الكهربائية بشكل واضح كالمكثفات والمقاومة السالبة أو التي تنتج أو تكشف الضوء.

الثنائيات العادية (Standard Diodes)



يشكل هذا النوع الغالبية العظمى من الثنائيات ويستخدم في التطبيقات التي تستغل الخاصية الأساسية للثنائي وهي السماح للتيار الكهربائي بالمرور في اتجاه واحد فقط. وأكثر ما يستخدم هذا النوع في دوائر التقويم (rectification circuits) وهي الدوائر التي تقوم بتحويل التيار المتناوب إلى تيار مباشر لتغذي الأجهزة والمعدات التي تعمل بالتيار المباشر وتأتي الثنائيات المستخدمة في هذا المجال بقيم تيار وجهد غاية في التنوع لتلبي حاجات مختلف أنواع المقومات (rectifiers). وبما أن معظم المقومات تحتاج لأربعة ثنائيات لبنائها فإنه يتم تصنيعها في الغالب في غلاف واحد بأربعة أطراف ويسمى الناتج بالمقوم الجسري (Bridge rectifier). وتستخدم أيضا في مضاعفات الجهد (voltage doublers) وهي دوائر إلكترونية تمكن من الحصول على جهود عالية من جهود منخفضة وفي دوائر القص والتثبيت (clipping and clamping circuits) وهي دوائر تعمل على تثبيت جهود الإشارات ضمن نطاقات محددة. وتستخدم كذلك في دوائر كشف التعديل (demodulators) في مستقبلات أنظمة الاتصالات كما في الكاشف الثنائي (diode detector) لتعديل الاتساع والكاشف النسبي (ratio detector) لتعديل التردد وغالبا ما تستخدم ثنائيات الجرمانيوم بدلا من السيليكون في هذا التطبيق لتدني قيمة الجهد المبيت فيها حيث يبلغ 0.3 فولت مقابل 0.7 فولت في السيليكون وذلك لكي تستجيب للإشارات الضعيفة.

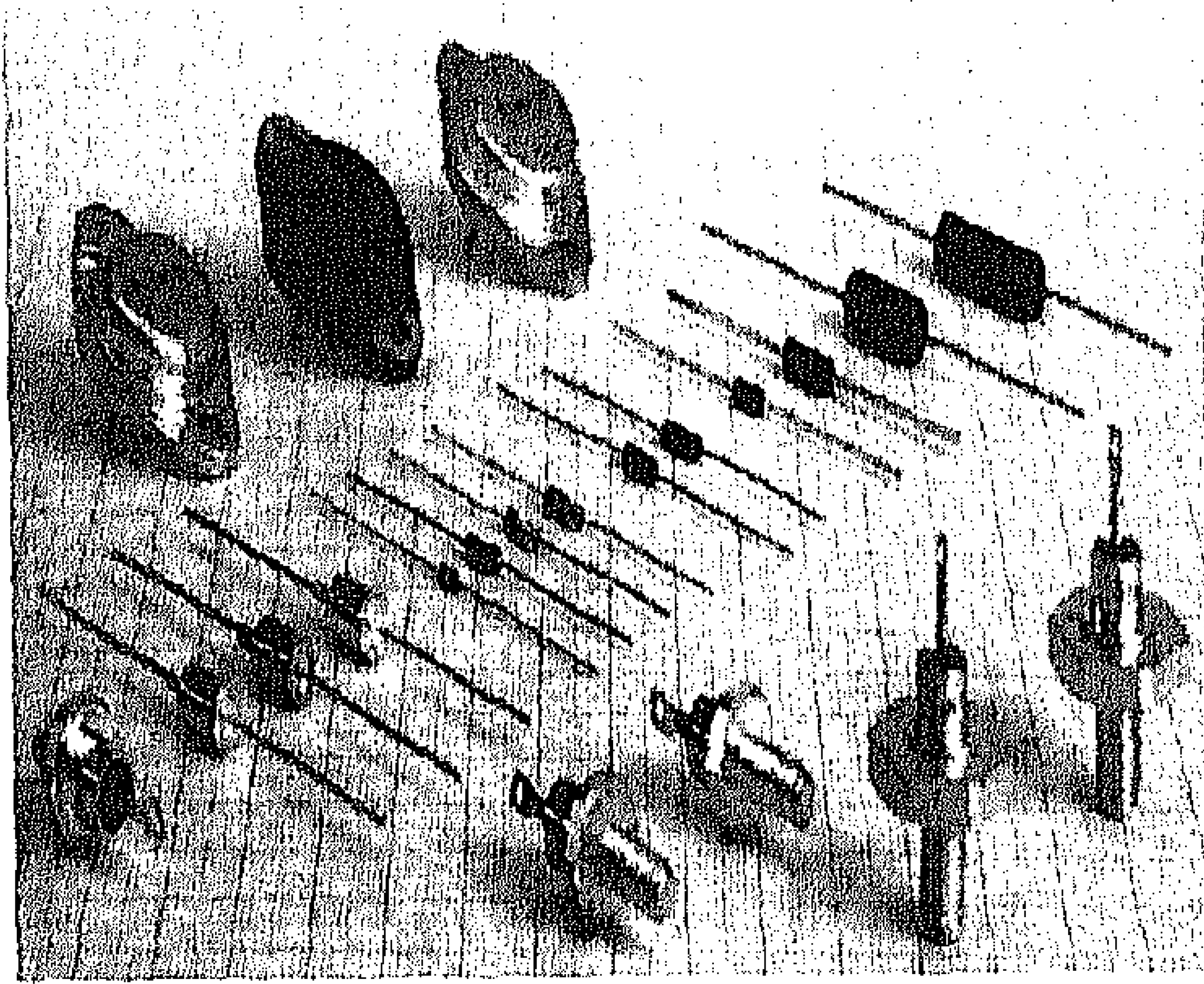
الثنائيات الإنهيارية (زينر) (Breakdown or Zener Diodes)

على الرغم من أن الثنائيات لا تسمح بمرور التيار من خلالها في حالة الانحياز العكسي إلا أنها ستنهار ويمر فيها تيارا عاليا إذا ما تجاوزت قيمة الجهد المسلط قيمة محددة يسمى جهد الانهيار (breakdown voltage). وإذا ما حصل انهيار في الثنائيات العادية فإن التيار العالي يسبب تلفا دائما لها ولا يمكن إعادة استخدامها أبدا. ولهذا فقد تم تصنيع ثنائيات يمكنها أن تعمل في منطقة الانهيار دون أن تتلف وذلك من خلال زيادة درجة تركيز التطعيم فيها إلى قيم محددة وتسمى هذه الثنائيات بثنائيات زينر ومن

ميزات هذا الثنائيات أن جهد الانهيار يبقى ثابتا إلى حد كبير بغض النظر عن قيمة تيار الانهيار المار فيهـا. وتستخدم هذه الثنائيات عند وصلها في وضع الانحياز العكسي لتثبيت وتنظيم الجهد المسلط على الدوائر الإلكترونية على جهد ثابت للحفاظ عليها من التلف إذا ما زادت قيمة جهد مغذيات الطاقة عن الجهد المقرر.

ثنائيات المكثف المتغير (Varactor or Varicap Diodes)

لقد ذكرنا سابقا أن المنطقة المنضبة (depletion region) التي تتكون عند الحد الفاصل بين المنطقة الموجبة والمنطقة السالبة تعمل كعازل بين المنطقتين تحول دون مزيد من هجرة الإلكترونات من المنطقة السالبة إلى المنطقة الموجبة. وفي حالة عدم وجود انحياز أو وجود انحياز عكسي على الوصلة فإن المنطقة المنضبة تعمل كمكثف ولذلك بسبب وجود شحنات موجبة عند طرفها الموجود في المنطقة السالبة وشحنات سالبة عند طرفها الموجود في المنطقة الموجبة. إن قيمة المواسعة (capacitance) لهذا المكثف تتناسب عكسيا مع عرض المنطقة المنضبة والذي يتحدد من قيمة جهد الانحياز العكسي المسلط على الوصلة وبهذا فإنه يمكن استخدام الثنائي وهو في وضع الانحياز العكسي كمكثف يمكن التحكم بمكاثفته من خلال الجهد المسلط عليه. وعلى الرغم من أنه يمكن استخدام جميع أنواع الثنائيات كمكثف محكوم بالجهد إلا أن قيم المواسعة فيها صغيرة جدا ولذلك قام المهندسون بتصنيع ثنائيات بتصاميم خاصة لرفع قيمة المواسعة فيها وذلك من خلال زيادة مساحة مقطع الوصلة ومن خلال التحكم بتركيز المواد المطعمة وأطلقوا عليها اسم ثنائيات المكثف المتغير. وتتراوح قيم المواسعة في هذه الثنائيات بين عدة بيكوفاراد عند أعلى جهد يمكن تسليطه على الثنائي وهو في حالة الانحياز العكسي إلى ما يزيد عن مائة بيكوفاراد عندما تكون قيمة الجهد المسلط صفرا. لقد أحدث اختراع ثنائيات المكثف المتغير ثورة كبيرة جدا في أنظمة الاتصالات الكهربائية فقد كانت الطريقة اليدوية هي الوسيلة الوحيدة لتوليف قنوات الراديو والتلفزيون وغيرها من الأجهزة من خلال استخدام مكثفات يمكن تغيير قيمة مكاثفتها بطريقة ميكانيكية. وبوجود هذه الثنائيات أصبح بالإمكان القيام بعملية التوليف من خلال تغيير الجهد المسلط عليها وبالتالي استخدام التقنيات الرقمية وأجهزة التحكم عن بعد في عمليات التوليف هذه. إن أكثر استخدامات ثنائيات المكثف المتغير هي في المذبذبات المحكومة بالجهد (voltage control oscillators) والتي تستخدم بدورها في العرى المقفلة طوريا (phase-locked loops) وهي دوائر إلكترونية تلعب دورا كبيرا في أنظمة الاتصالات الحديثة.



ثنائيات شوتكي (Schottky Diodes)

ينسب اسم هذه الثنائيات إلى العالم الألماني وولتر شوتكي (Walter Schottky) الذي أكتشف التأثير المسمى باسمه والذي تعمل هذه الثنائيات على أساسه. فعلى العكس من الثنائيات العادية التي تبنى فيها

منطقتي الوصلة الموجبة والسالبة من مادة شبه موصلة فإن ثنائيات شوتكي تبنى من مـادة معدنيـة للمنطقـة الموجبة ومن مادة شبه موصلة للمنطقة السالبة وبسبب الموصلية العالية للمعدن فإن المنطقة المنضـبة توجـد فقط في جهة المادة شبه الموصلة. ومن ميزات هذه الثنائيات أنه يمكن التحكم بالجهد المبيت للوصلة من خلال التحكم بتركيز التطعيم في المادة شبه الموصلة والحصول على قيم صغيرة لها حيث يمكن الحصول على قـيم تتراوح بين 0.15 فولت إلى 0.45 فولت. ومن الميزات المهمة لها أيضـا سـرعة التبـديل العاليـة جـدا (switching speed) مقارنة بالثنائيات العادية وذلك بسبب غياب عملية الاتحاد بين الإلكترونات والفجـوات في المنطقة المنضبة في ثنائيات شوتكي حيث لا يوجد فيها إلا نوع واحد مـن حـاملات الشـحنات وهـي الإلكترونات. تستخدم ثنائيات شوتكي في تطبيقات كثيرة من أهمها دوائر المنطق الرقمي حيث تستخدم لمنـع الترانزستورات فيها من الدخول في منطقة التشبع حيث يتطلب الخروج منها وقتا طويلا نسبيا عند تحولها من وضع الوصل إلى وضع الفصل. وتستخدم في دوائر التقويم لانخفاض جهدها المبيت مما يرفع مـن كفـاءة وكذلك سرعة هذه المقومات.

الثنائيات الباعثة للضوء والليزر (Light Emitting & laser diodes)

تم تصنيع أول ثنائي باعث للضوء المرئي علـى يـد العـالم الأمريكـي نـك هولونيـاك (Nick Holonyak) وذلك في عام 1962م. فعند تسليط جهد بانحياز أمامي على وصلة موجب -سالب فـإن تيـارا كهربائيا سيسري فيها وتكون الإلكترونات التي تتحرك بعكس اتجاه التيار أي باتجاه المنطقة المنضـبة هـي الحاملات الرئيسية لهذا التيار في المنطقة السالبة بينما تكون الفجوات التي تتحرك بـنفس اتجـاه التيـار أي باتجاه المنطقة المنضبة أيضا هي الحاملات الرئيسية لهذا التيار فـي المنطقـة الموجبـة. وعنـدما تلتقـي الإلكترونات مع الفجوات في داخل المنطقة المنضبة فإن عملية اتحاد تتم بينهما وتتحرر كمية من الطاقة تمثل الفرق بين مستويات الطاقة للإلكترونات الموجودة في نطاق التوصـيل (conduction band) ومسـتويات الطاقة للفجوات الموجودة في نطاق التكافؤ (valence band). إن شكل الطاقة المتحررة يتحدد مـن طبيعـة المادة شبه الموصلة التي يتكون منها الثنائي ففي عناصر السيليكون والجرمانيوم تضيع هذه الطاقة على شـكل حرارة تعمل على تسخين الثنائي وذلك بسبب أن فجوة النطاق لهذه المواد من النوع غير المباشر (indirect bandgap). ويمكن الاستفادة من هذه الطاقة المتحررة لتنبعث على شكل ضوء في حالة استخدام مواد شـبه موصلة مركبة من عناصر العامود الثالث والخامس في الجدول الدوري حيث أن لها فجوة نطاق مـن النـوع المباشر (direct bandgap). ومن خلال التحكم بنسب العناصر المكونة للمادة شبه الموصلة يمكـن تحديـد طول الموجة للضوء المنبعث من هذه الثنائيات والذي يقع في الغالب في الجزء المرئي وما تحت الأحمر مـن الطيف الضوئي. فعلى سبيل المثال فإن زرنخيد القاليوم والألمنيوم (AlGaAs) يشع اللون الأحمر والأشـعة تحت الحمراء غير المرئية ويشع فوسفيد القاليوم والألمنيوم (AlGaP) الضوء الأخضر ويشـع فوسـفيد الزرنيخ والقاليوم (GaAsP) الضوء الأصفر والبرتقالي ويمكن لفوسفيد القـاليوم (GaP) أن يشـع جميـع ألوان الطيف وذلك حسب نسبة مكوناته ويشع نتريد القاليوم والأنديوم (InGaN) الضوء الأزرق.

وتستخدم الثنائيات الباعثة للضوء في تطبيقات لا حصر لها كما في أنظمة الاتصـالات الضـوئية وأجهزة التحكم عن بعد في الأجهزة المنزلية والتي تستخدم الأشعة تحت الحمراء غير المرئيـة وكمؤشـرات ضوئية لمختلف أنواع الأجهزة الكهربائية وكذلك لأغراض الإنارة الخفيفة. لا تختلف ثنائيـات الليـزر عـن

الثنائيات الباعثة للضوء من حيث أنها تتكون من وصلة موجب-سالب وتستخدم نفس المواد شبه الموصلة وتعمل تحت الانحياز الأمامي إلا أنه في حالة الليزر يتم وضع الوصلة في داخل فجوة رنين (resonant cavity) للحصول على ما يسمى بالانبعاث المستثار (stimulated emission) بدلا من الانبعاث التلقائي (spontaneous emission) في حالة الثنائي الباعث للضوء. ويتميز ضوء الليزر على ضوء الثنائي الباعث للضوء بأن له شعاع عالي التوجيه حيث يكون على مقطع شعاعه ضيق جدا ويسير لمسافات طويلة دون أن يتشتت وكذلك فإن ضوءه عالي النقاء والذي يعني أن نطاق الترددات التي يشعها أضيق بكثير من تلك التي للثنائي الباعث للضوء. ويستخدم ثنائي الليزر في التطبيقات التي لا يمكن للثنائي الباعث للضوء أن يعمل فيها كما في جميع أنواع الأقراص المدمجة وفي أجهزة المساحة وفي الرادارات الضوئية وفي أجهزة تصحيح النظر وغير ذلك من التطبيقات.

الثنائيات الكاشفة للضوء (Photodiodes)

يقوم الثنائي الكاشف للضوء بعكس مهمة الثنائي الباعث للضوء حيث يقوم وهو في وضع الانحياز العكسي بتحويل الضوء الساقط عليه إلى تيار كهربائي تتناسب قيمته طرديا مع شدة الضوء الساقط. وتتلخص آلية عمل هذا الثنائي على النحو التالي: فعندما يسقط فوتون ضمن المنطقة المنضبة وتكون طاقته أكبر من عرض فجوة النطاق للمادة شبه الموصلة المستخدمة فإنه سيحرر إلكترون من أحد الذرات ويضعه في نطاق التوصيل مخلفا وراءه فجوة في نطاق التكافؤ. وبسبب وجود مجال كهربائي عالي في المنطقة المنضبة بسبب الانحياز العكسي فإن هذا المجال سيسحب الإلكترون باتجاه القطب الموجب والفجوة باتجاه القطب السالب فيسري بذلك تيار كهربائي في الدائرة الخارجية تتناسب قيمته مع عدد فوتونات الضوء الساقطة على الثنائي. ولا يشترط لعمل هذا الثنائي وجود مواد شبه موصلة بفجوة نطاق مباشرة كما هو الحال في الباعث الضوئي بل يمكن استخدام السيليكون والجرمانيوم كمواد لتصنيع هذا الثنائي حيث يستجيب ثنائي السيليكون للضوء بطول موجة تمتد من 190 نانومتر إلى 1100 نانومتر بينما يستجيب ثنائي الجرمانيوم للضوء بطول موجة تمتد من 400 نانومتر إلى 1700 نانومتر وكلاهما يغطي طيف الجزء المرئي من الضوء إلا أن ثنائي الجرمانيوم يغطي كذلك الطيف تحت الأحمر الذي تعمل عنده أنظمة الاتصالات الضوئية. ولكي يتمكن الثنائي من جمع أكبر كمية من الضوء ضمن المنطقة المنضبه فإنه يتم تصنيعه بحيث يوجد منطقة غير مطعمة (intrinsic) بين المنطقة الموجبة والسالبة لتغطي بذلك المنطقة المنضبة جزء من المنطقة الموجبة والسالبة وكامل المنطقة غير المطعمة ويسمى الثنائي الضوئي الناتج بثنائي (PIN). وتستخدم الثنائيات الكاشفة للضوء في تطبيقات كثيرة كما في مستقبلات أنظمة الاتصالات الضوئية ومستقبلات أنظمة التحكم عن بعد وفي الأقراص المدمجة وغيرها. ويمكن أن يستخدم هذا الثنائي في حالة غياب الانحياز لتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية بما يسمى الخلايا الشمسية (solar cells or photovoltaic cell).

وإلى جانب هذه الثنائيات الرئيسية يوجد أنواع أخرى من الثنائيات تستخدم في تطبيقات مختلفة منها الثنائيات النفقية (Tunnel Diodes) والذي اخترعها الياباني ليونا إيساكي (Leona Esaki) في عام 1958م وتتميز هذه الثنائيات بوجود ظاهرة المقاومة السلبية (negative resistance) في منحنى التيار مع الجهد وهي في حالة الانحياز الأمامي حيث ينقص التيار مع زيادة الجهد في منطقة معينة على المنحنى ويتم تصنيع هذه الثنائيات من خلال زيادة تركيز التطعيم بشكل كبير في الوصلة. وتستغل ظاهرة المقاومة السلبية

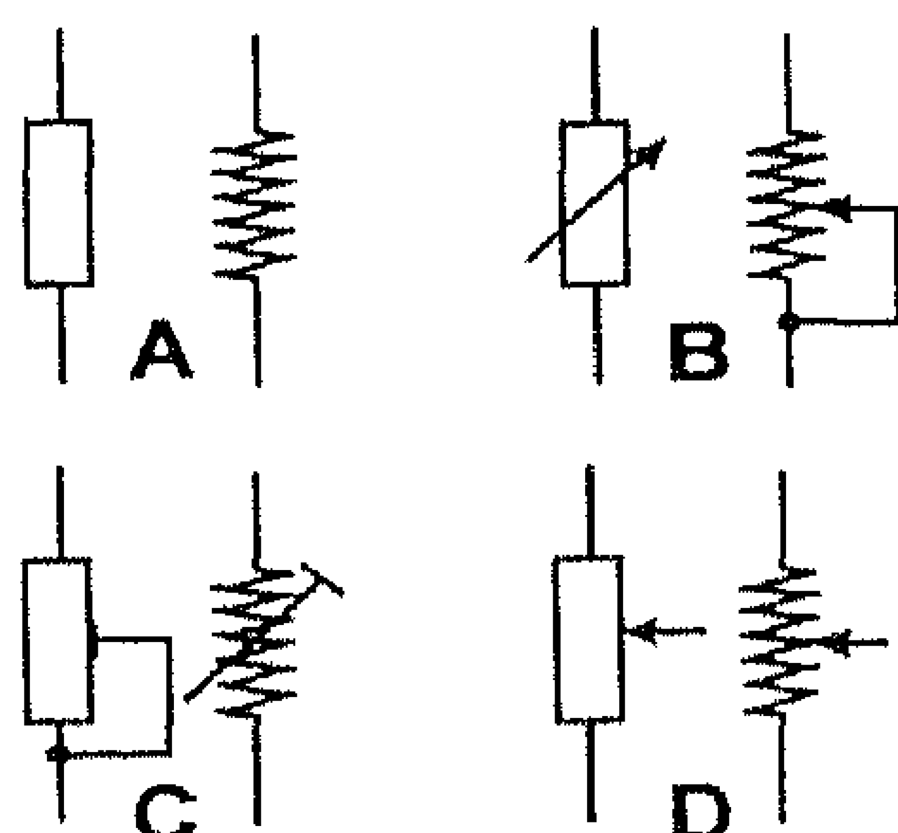
في هذه الثنائيات لتصميم المذبذبات ذات الترددات العالية التي تزيد عن 300 ميجاهيرتز. وتظهر المقاومة السلبية أيضا في ثنائي آخر وهو ثنائي قن (Gunn diode) نسبة لمخترعه الإنكليزي جون قن (John Gunn) في عام 1963م والذي يختلف عن باقي الثنائيات بأنه مصنع من مادة شبه موصلة مطعمة بنوع واحد من التطعيم وهو النوع السالب وعند تسليط جهد كهربائي مباشر على هذا الثنائي فإنه يبدأ بالعمل كمذبذب تتحد قيمة تردده من طول الثنائي ونوع المادة المصنع منها والتي غالبا ما تكون زرنخيد القاليوم ويستخدم هذا الثنائي كمذبذب في نطاق الموجات الدقيقة أو الميكروويف.

4-8 المقاومات والمكثفات والمحاثات والمصوغات

تبنى الدوائر الإلكترونية من نوعين رئيسين من العناصر الإلكترونية فالنوع الأول هي العناصر الفعالة (active components) كالصمامات والترانزستورات والثنائيات بأنواعها المختلفة والنوع الثاني هي العناصر السلبية (passive components) كالمقاومات والمكثفات والمحاثات. وغالبا ما تكون العلاقة بين الجهد والتيار في العناصر الفعالة علاقة غير خطية (nonlinear) وتعتمد الدوائر الإلكترونية على هذه العلاقة غير الخطية للقيام بوظائفها المختلفة كالتضخيم والتبديل. أما في العناصر السلبية فإن العلاقة بين الجهد والتيار علاقة خطية (linear) وتستفيد الدوائر الإلكترونية من هذه العلاقة الخطية للقيام بوظائف مكملة لوظائف العناصر الفعالة. وإلى جانب العناصر الفعالة والسلبية فإن الدوائر الإلكترونية تحتاج لمصدر تيار مباشر (power supply) كالبطاريات لكي يمدها بالطاقة اللازمة لتشغيلها.

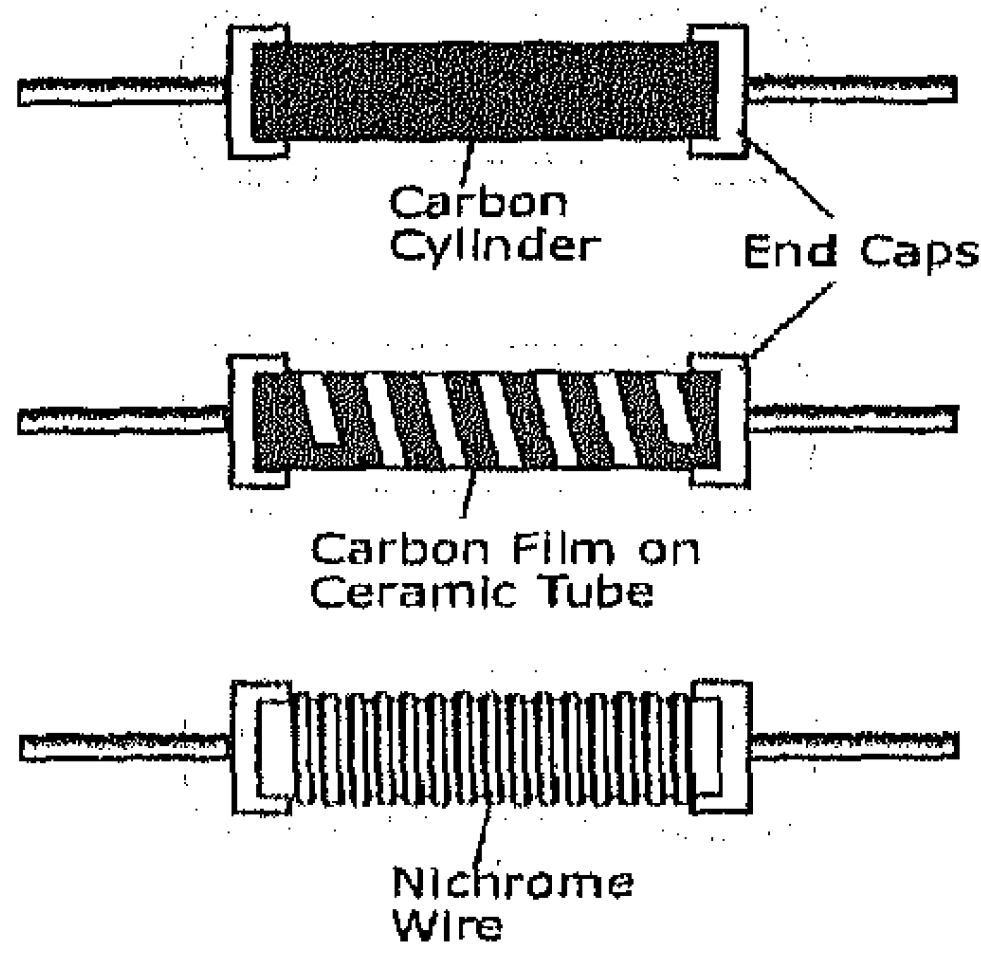
المقاومات (Resistors)

المقاومة هي عنصر إلكتروني سلبي (passive) بطرفين يتم تصنيعه من مادة موصلة للكهرباء ولكن ذات مقاومية (resistivity) عالية نسبيا. وغالبا ما يستخدم الكربون لتصنيع المقاومات إما على شكل مسحوق كربوني يخلط بمسحوق مادة خزفية بنسبة معينة تحدد قيمة المقاومة أو على شكل فلم رقيق (thin film) من الكربون يلف بشكل حلزوني على محيط أسطوانة خزفية وبطول وعرض محددين. وفي التطبيقات التي تحتاج مقاومات صغيرة تتحمل تيارات عالية يتم تصنيع المقاوم على شكل سلك رفيع يلف حول أسطوانة خزفية. وتصنع المقاومات بقيم تتراوح بين المللي أوم ومئات الملايين من الأوم ولكن بقيم معيارية متعارف عليها بين الشركات

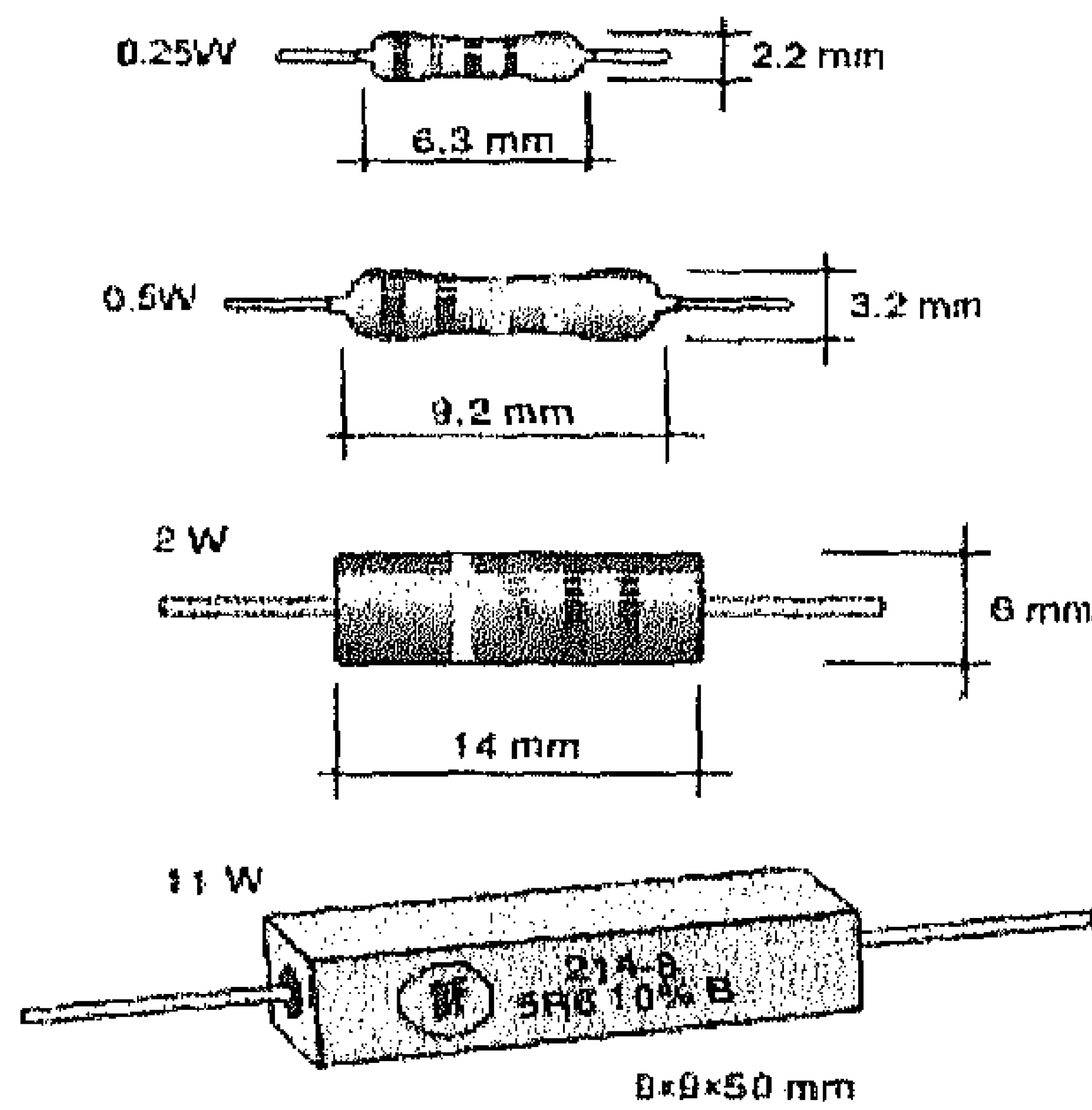


الصانعة على شكل سلسلات كسلسلة E12 وسلسلة E24 وغيرها من السلسلات. فعلى سبيل المثال فإن سلسلة E24 تحتوي على أربعة وعشرون قيمة تغطي المدى الواقع بين عشرة أومات ومائة أوم وبنفس عدد القيم للمدى الواقع بين مائة أوم وألف أوم وهكذا دواليك. ويمكن معرفة قيمة المقاومة من خلال أشرطة ملونة مطبوعة على سطح المقاوم يبلغ عددها أربعة أو خمسة أشرطة ففي الأربعة أشرطة فإن أول شريطين من اليسار يستخدمان لتحديد رقمين عشرين من قيمة المقاومة والثالث لتحديد عدد الأصفار التي تضاف لقيمة المقاومة والرابع لتحديد نسبة الخطأ في قيمة المقاومة الاسمية (tolerance) أما في حالة الخمسة أشرطة فإن

أول ثلاثة أشرطة تستخدم لتحديد أول ثلاثة أرقام من قيمة المقاومة وذلك لزيادة دقتها. وكما هو معروف فإن العلاقة بين الجهد والتيار للمقاوم علاقة خطية يحكمها قانون أوم (Ohm's Law) فالجهد يساوي حاصل ضرب قيمة التيار في قيمة المقاومة المقاسة بالأوم نسبة لمكتشف هذه العلاقة أوم. ويحول المقاوم الطاقة الكهربائية المسلطة عليه بكاملها إلى طاقة حرارية حيث تساوي هذه الطاقة حاصل ضرب مربع قيمة التيار المار في قيمة المقاومة.

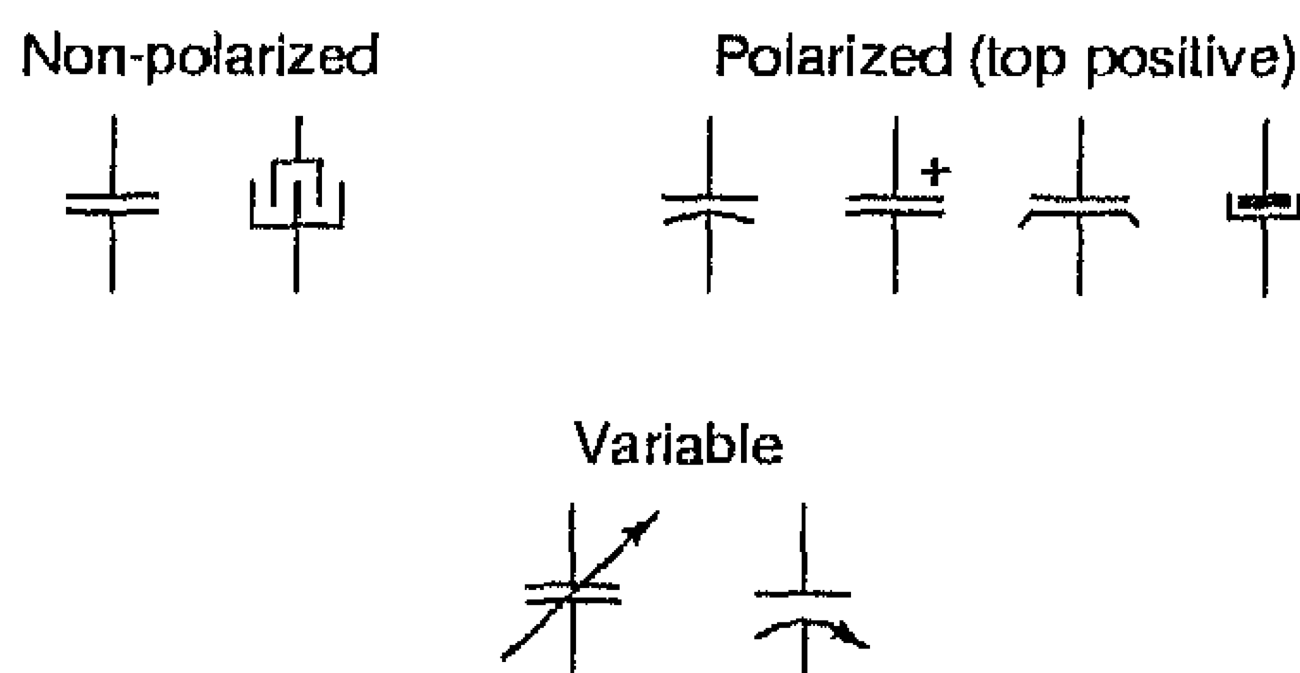


وتصنع المقاومات بأشكال مختلفة كالمقاومات الثابتة والمتغيرة وبقيم مختلفة للتيارات والجهود والقدرات التي يمكن أن تتحملها دون أن تعطب. وكذلك تصنع بنسب مختلفة للخطأ في قيمها الاسمية (tolerance) حيث تتراوح نسب الخطأ بين واحد بالألف للأنواع الممتازة المستخدمة في التطبيقات الصناعية والعسكرية وعشرين بالمائة للأنواع الرديئة. وإذا ما وصلت المقاومات على التوالي فإن قيمة المقاومة المكافئة لها تساوي مجموع قيم المقاومات المنفردة أما إذا وصلت على التوازي فإن معكوس قيمة المقاومة المكافئة تساوي مجموع معكوسات كل قيمة من قيم المقاومات المنفردة. وتستخدم المقاومات في الدوائر الإلكترونية لأغراض مختلفة منها تحديد كمية التيارات التي تسري في الأجزاء المختلفة لهذه الدوائر وكذلك تحديد نقطة التشغيل (operating point) للترانزستورات والثنائيات الموجودة في هذه الدوائر. وتستخدم كذلك لتحويل تيارات الترانزستورات إلى جهود وذلك للحصول على كسب عالي بين الإشارات الداخلة والخارجة من المضخمات. وتستخدم المقاومات المتغيرة للحصول على جهد متغير القيمة من جهد ثابت وكذلك للحصول على قيم مقاومات محددة ودقيقة في حالة عدم توفر القيمة في المقاومات الثابتة. وتستخدم المقاومات في المصابيح والدفايات لتحويل التيار الكهربائي إلى طاقة ضوئية أو حرارية.



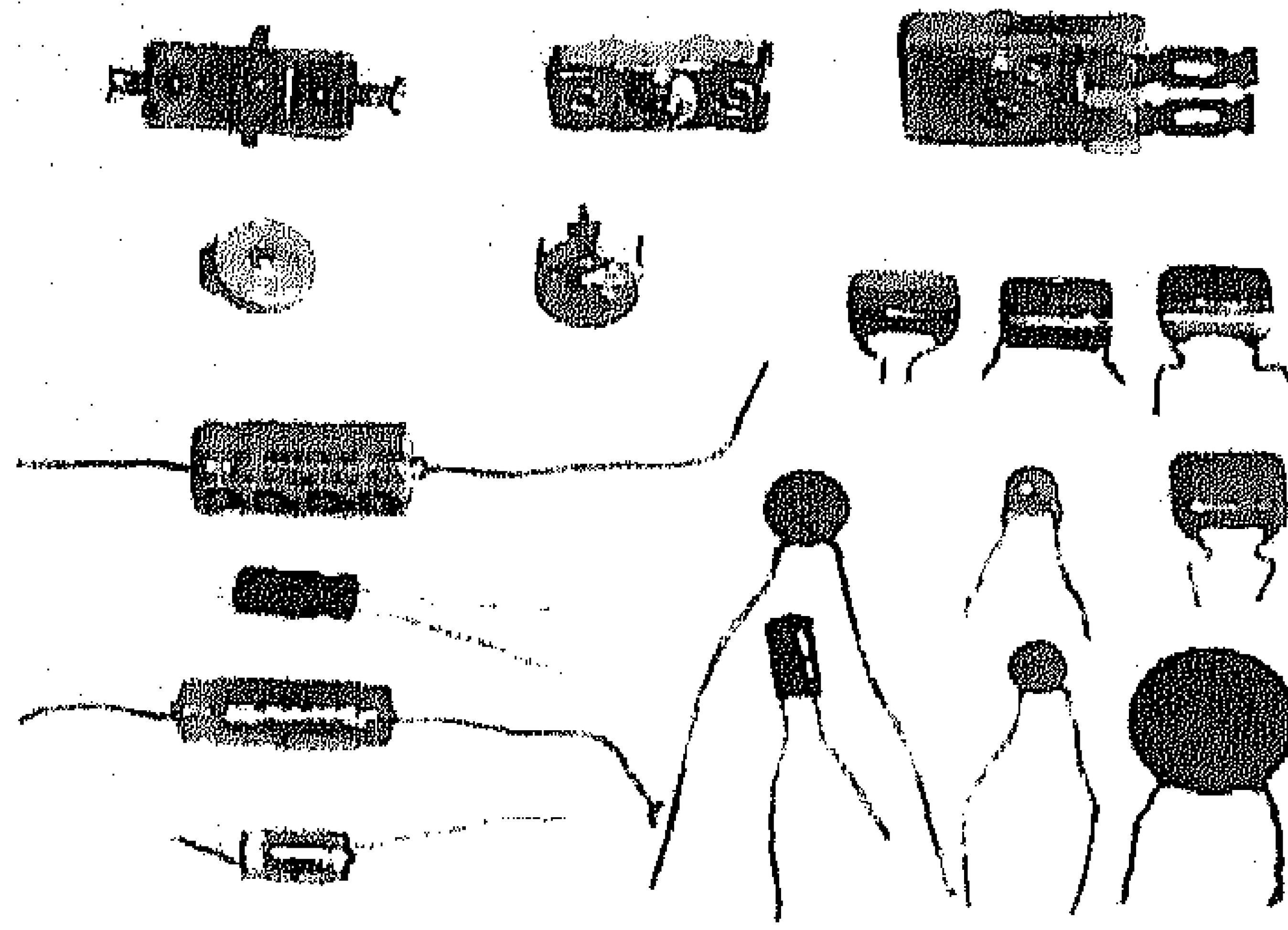
المكثفات (Capacitors)

المكثف عنصر سلبي بطرفين ويتكون من لوحين معدنيين رقيقين يفصل بينهما طبقة بسماكة محددة من مادة عازلة للكهرباء كالورق والزجاج والخزف والبلاستيك والميكا . وغالبا ما تتحدد خصائص المكثف المختلفة من نوع العازل المستخدم فالعوازل تتفاوت تفاوتا كبيرا



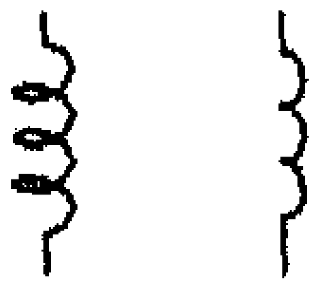
في خصائصها الكهربائية من حيث قيم سماحيتها وجهودها الإنهيارية وتأثر سماحيتها بدرجة الحرارة والتردد. ويوجد نوعان من المكثفات وهي المكثفات اللامستقطبة (non-polarized) والتي لا تتأثر بقطبية الجهد المسلط عليها ولذا فإنه يمكن استخدامها في دوائر التيار الثابت والمتناوب والمكثفات المستقطبة (polarized) والتي تتأثر بقطبية الجهد المسلط عليها ولذا لا تستخدم إلا في دوائر التيار الثابت بحيث يكون قطبها الموجب موصولا بالطرف الموجب لمصدر الجهد. إن المكثف لا يمرر التيار الكهربائي المباشر من خلاله بسبب المادة العازلة وعلى هذا فإنه يعتبر دائرة مفتوحة (open circuit) للتيارات الثابتة ولكن عند تسليط جهد ثابت عليه فإن شحنات كهربائية موجبة وسالبة تتجمع على اللوحين منتجة مجالا كهربائيا ثابتا بينهما مما يجعله أداة لتخزين الشحنات الكهربائية. وتتناسب كمية الشحنة المخزنة على المكثف طرديا مع قيمة الجهد ($Q = CV$) ويسمى ثابت التناسب C بمواسعة (capacitance) المكثف والتي تقاس بالفراد (Farad) نسبة للعالم الشهير فارادي. وتتناسب قيمة المواسعة طرديا مع السماحية الكهربائية (permittivity) للمادة العازلة وكذلك مساحة اللوح الواحد وعكسيا مع سماكة الطبقة العازلة. وعلى العكس من المقاوم فإن المكثف المثالي لا يبدد الطاقة الكهربائية التي تمدها به مصادر الطاقة المختلفة بل يحتفظ بها إذا كان معزولا أو يفرغها في عناصر إلكترونية أخرى.

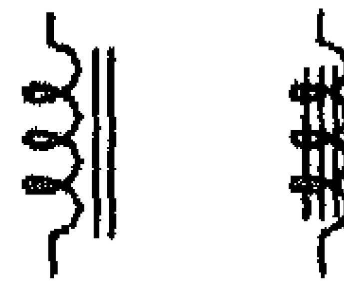
وتتوفر المكثفات بقيم تتراوح بين البيكوفاراد (جزء من ألف بليون جزء من الفاراد) وعدة آلاف من الميكروفاراد (جزء من مليون جزء من الفاراد) بقيم معيارية متفق عليها بين الشركات الصانعة. ويمكن معرفة قيمة المكثف من خلال عدة أرقام عشرية مكتوبة عليها فالأرقام باستثناء الرقم الأخير تحدد الأرقام الأولى من قيمة المكثف أما الرقم الأخير فيحدد عدد الأصفار التي تضاف لقيمة المكثف وتكون القيمة بالبيكوفاراد أما نسبة الخطأ في قيمة المكثف الاسمية (tolerance) فتحدد من خلال الأحرف. وإذا ما تم فصل مصدر الجهد عن المكثف بعد شحنه فإنه يحتفظ بنفس قيمة الجهد على طرفيه وتساوي كمية الطاقة المخزنة في المجال الكهربائي نصف حاصل ضرب المواسعة في مربع الجهد ($E = 0.5\ C\ V^2$). ومن خصائص المكثف أنه يقاوم أي تغير للجهد المسلط على طرفيه فعند تسليط جهد متغير عليه فإن تيارا سيسري خلال المكثف تتناسب قيمته طرديا مع معدل تغير الجهد مع الزمن ويساوي ثابت التناسب قيمة مواسعة المكثف. وفي حالة تسليط جهد متناوب له شكل جيبي وتردد ثابت فإنه من السهل إثبات أن علاقة التيار بالجهد علاقة خطية يحكمها قانون أوم ($V = X_c\ I$) ويسمى ثابت التناسب بالممانعة المواسعية (capacitive reactance X_c) والتي تتناسب قيمتها عكسيا مع حاصل ضرب المواسعة C بالتردد f ($X_c = 1/(2\ \pi\ f\ C)$). هذا بالإضافة إلى أن الجهد والتيار في المكثف ليس لهما نفس الطور (phase) بل يتقدم التيار بمقدار ربع دورة (تسعين درجة) عن الجهد. وإذا ما وصلت المكثفات على التوازي فإن قيمة المواسعة المكافئة لها تساوي مجموع قيم المواسعات المنفردة أما إذا وصلت على التوالي فإن معكوس قيمة المواسعة المكافئة تساوي مجموع معكوسات كل قيمة من قيم المواسعات المنفردة وذلك على العكس من قانون المقاومات.

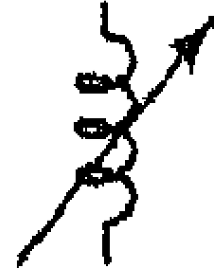


ويستخدم المكثف في الدوائر الإلكترونية للقيام بمهام عدة منها عزل الجهود والتيارات الثابتة التي تحدد نقاط التشغيل للترانزستورات عن الدوائر التي تغذي الجهود والتيارات المتناوبة إليها. وتستخدم بوجود المقاومات والمحثات كمرشحات لترددات الإشارات (filters) بالاعتماد على خاصيتها الرئيسية وهي أن ممانعتها تنقص مع زيادة التردد. وتستخدم كذلك لمنع التيارات الثابتة من المرور مع التيارات المتغيرة وللتخلص من التيارات المتغيرة المصاحبة للتيارات الثابتة في المقومات (rectifiers). وتستخدم لتخزين الطاقة الكهربائية والإشارات الكهربائية لفترات قصيرة في تطبيقات كثيرة كما في فلاشات الكميرات وبعض أنواع الليزر وفي معالجة الإشارات.

المحاثات (Inductors)





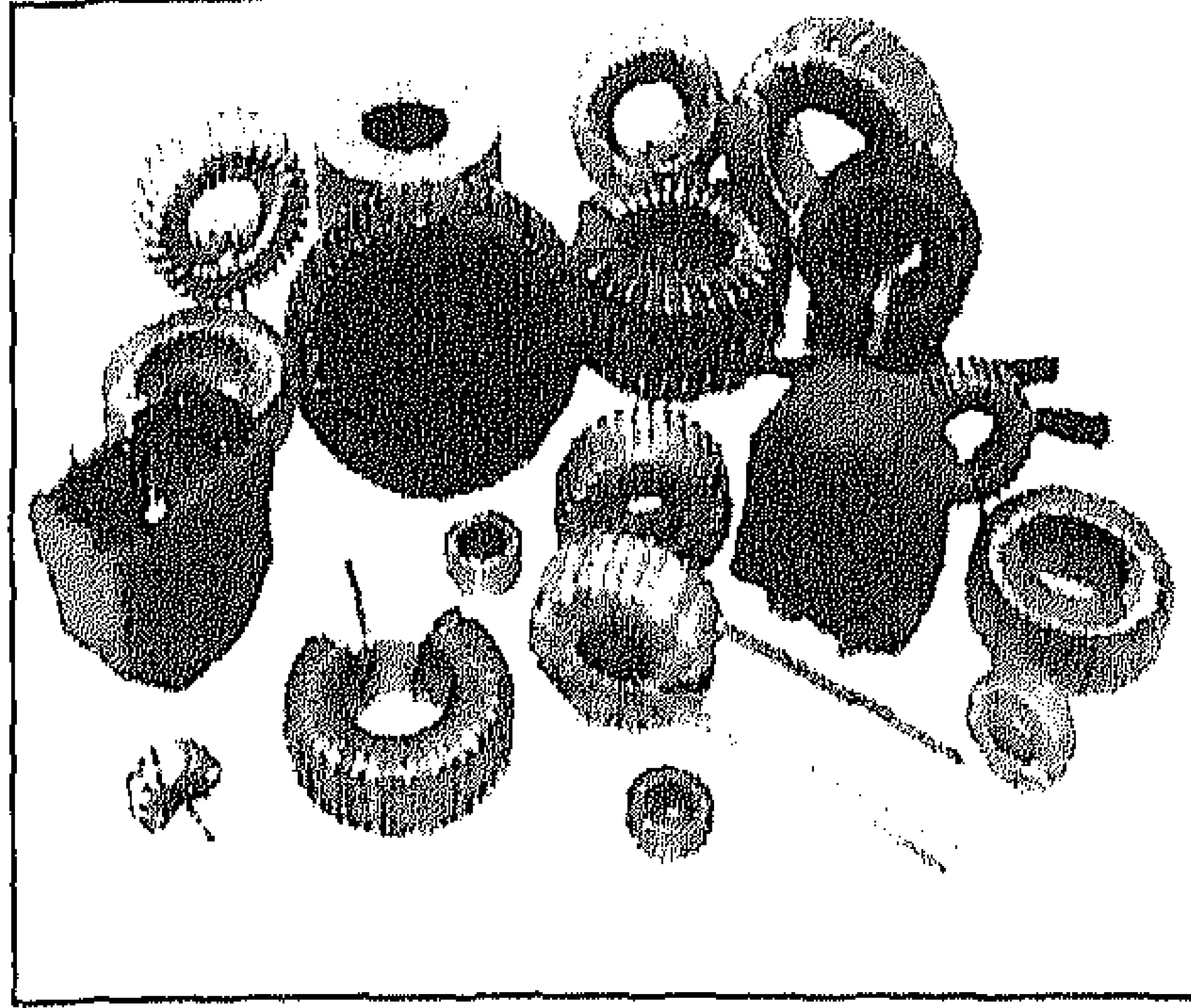






المحث عنصر سلبي بطرفين ويتكون من سلك معدني عالي الموصلية كالنحاس مثلا يتم لفه على جسم أسطواني الشكل بقلب هوائي أو من أي مادة عازلة أو بقلب حديدي وبعدد محدد من اللفات ولذا يسمى أحيانا بالملف (coil). وعند تمرير تيار ثابت في محث مثالي تبلغ مقاومة سلكه الصفر فإن الجهد الكهربائي المقاس على طرفيه يساوي صفرا. وهذا يعني أنه عند تسليط جهد ثابت عليه فإن التيار المار فيه سيبلغ قيمة لا نهائية ولهذا فإن المحث يتصرف كدائرة قصر (short circuit) للجهد الثابت وذلك على العكس من المكثف الذي يعتبر دائرة مفتوحة (open circuit) للجهد الثابت. ويولد المحث عند تمرير تيار ثابت من خلاله مجالا مغناطيسيا تتناسب قيمته طرديا مع قيمة التيار ويسمى ثابت التناسب L بمحاثة (inductance) المحث والتي تقاس بالهنري (Henry) نسبة للعالم المعروف جوزيف هنري. وتتناسب قيمة المحاثة للملف طرديا مع النفاذية المغناطيسية (permeability) لمادة قلب الملف وطرديا مع مربع عدد اللفات أما ثابت التناسب فيتحدد من أبعاد القلب وكذلك شكله. وتتوفر المحثات بقيم تتراوح بين أجزاء من الميكروهنري (جزء من مليون جزء من الهنري) وعدة مئات من المللي هنري (جزء من ألف جزء من الهنري) وبقيم معيارية متفق عليها بين الشركات الصانعة. ويمكن معرفة قيمة المحث من خلال نظام الأشرطة كتلك المستخدمة في المقاومات أو من خلال كتابة قيمة المحاثة عليه. وتساوي كمية الطاقة المخزنة في المجال المغناطيسي المتولد عن مرور تيار ثابت نصف حاصل ضرب المحاثة في مربع التيار ($E= 0.5\ L\ I^2$). ومن خصائص المحث أنه يقاوم أي تغير للتيار المار فيه فعند تمرير تيار متغير في المحث فإن قيمة الجهد المتولد على أطرافه تتناسب طرديا مع معدل تغير التيار مع الزمن ويساوي ثابت التناسب قيمة محاثة الملف والتي تقاس بالهنري (Henry). وفي حالة تسليط جهد متناوب ذي شكل جيبي وبتردد ثابت فإنه من السهل إثبات أن علاقة قيمة التيار بقيمة الجهد علاقة خطية يحكمها قانون أوم ($V = X_L\ I$) ويسمى ثابت التناسب الممانعة الحثية (inductive reactance X_L) والتي تتناسب قيمتها طرديا مع حاصل ضرب المحاثة L بالتردد f (($X_L = 2\ \pi\ f\ L$)). هذا بالإضافة إلى أن الجهد والتيار في المحث ليس لهما نفس الطور (phase) بل يتأخر التيار بمقدار ربع دورة (تسعين درجة) عن

الجهد. وإذا ما وصلت المحثات على التوالي فإن قيمة المحاثة المكافئة لها تساوي مجموع قيم المحاثات المنفردة أما إذا وصلت على التوازي فإن معكوس قيمة المحاثة المكافئة تساوي مجموع معكوسات كل قيمة من قيم المحاثات المنفردة كما في قانون المقاومات.



ويستخدم المحث في الدوائر الإلكترونية للقيام بمهام كثيرة منها استخدامه بوجود المقاومات والمكثفات كمرشح لترددات الإشارات (filter) بالاعتماد على خاصيته الرئيسية وهي أن ممانعته تزداد مع زيادة التردد. ويستخدم المحث مع المكثف كدائرة رنين (resonant circuit) تستخدم في المذبذبات والمرشحات النطاقية. ويستخدم كذلك كخانق للترددات الراديوية (radio frequency choke RFC) حيث يمنع تسرب الترددات العالية إلى مصادر التغذية في الدوائر الإلكترونية.

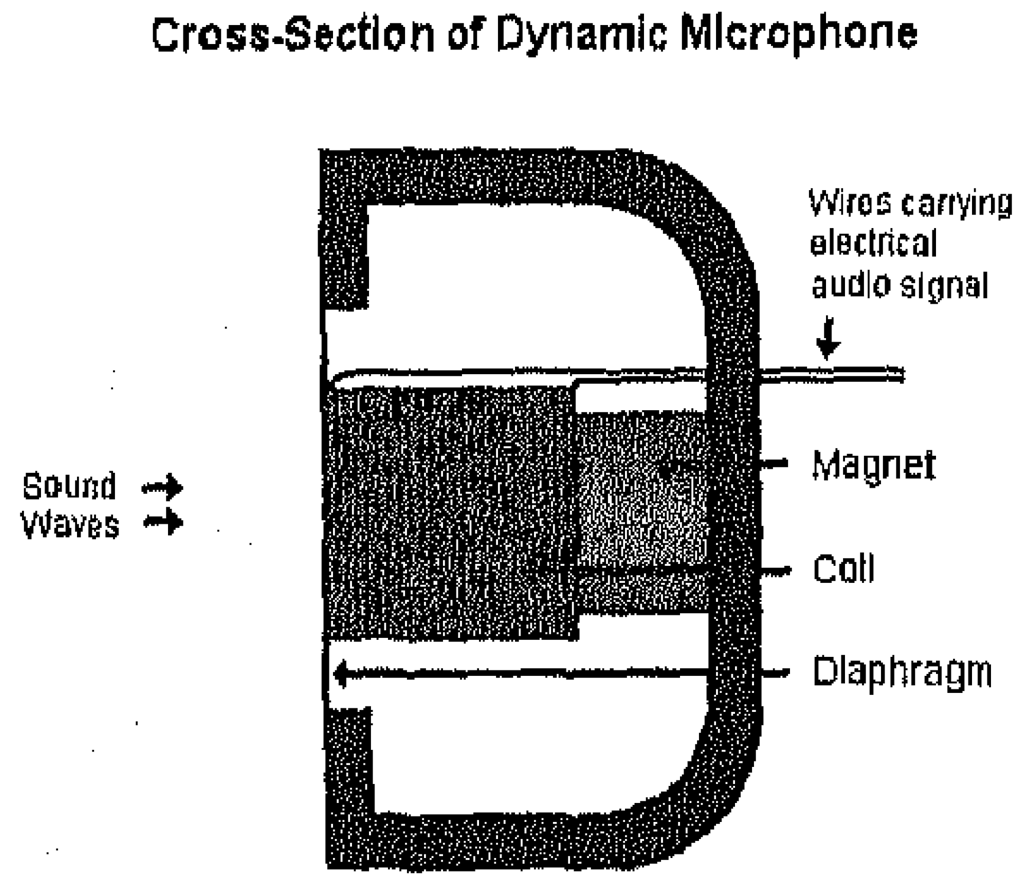
المصوغات (Transducers)

تستخدم المصوغات لتحويل مختلف أشكال الإشارات غير الكهربائية إلى إشارات كهربائية ليتم معالجتها ونقلها وتخزينها من قبل الأجهزة والمعدات الإلكترونية وكذلك تحويل الإشارات الكهربائية المعالجة إلى شكلها الأصلي غير الكهربائي. ويوجد أنواع لا حصر لها من المصوغات تستخدم لتحويل مختلف أنواع الإشارات التي تحمل في طياتها معلومات ما على شكل طاقة غير كهربائية إلى إشارات كهربائية وبالعكس. ففي أنظمة الاتصالات تستخدم الميكروفونات والسماعات والكميرات وأنابيب الأشعة المهبطية كمصوغات دخل وخرج للإشارات السمعية والمرئية. وفي الحواسيب تستخدم لوحات المفاتيح والفارات والماسحات الضوئية والطابعات والشاشات كمصوغات دخل وخرج لمختلف إشارات المعلومات. وفي أنظمة القياس والتحكم تستخدم الحساسات (sensors) بمختلف أنواعها والمحركات الخطوية (stepper motors) والمرحلات (relays) كمصوغات دخل وخرج تتعامل مع مختلف أشكال الطاقة كالحرارية والضوئية والحركية والكيميائية. وسنقتصر في هذا الباب على شرح مصوغات الإشارات السمعية وهي الميكروفونات والسماعات ونؤجل شرح باقي المصوغات في باب أنظمة القياس والتحكم.

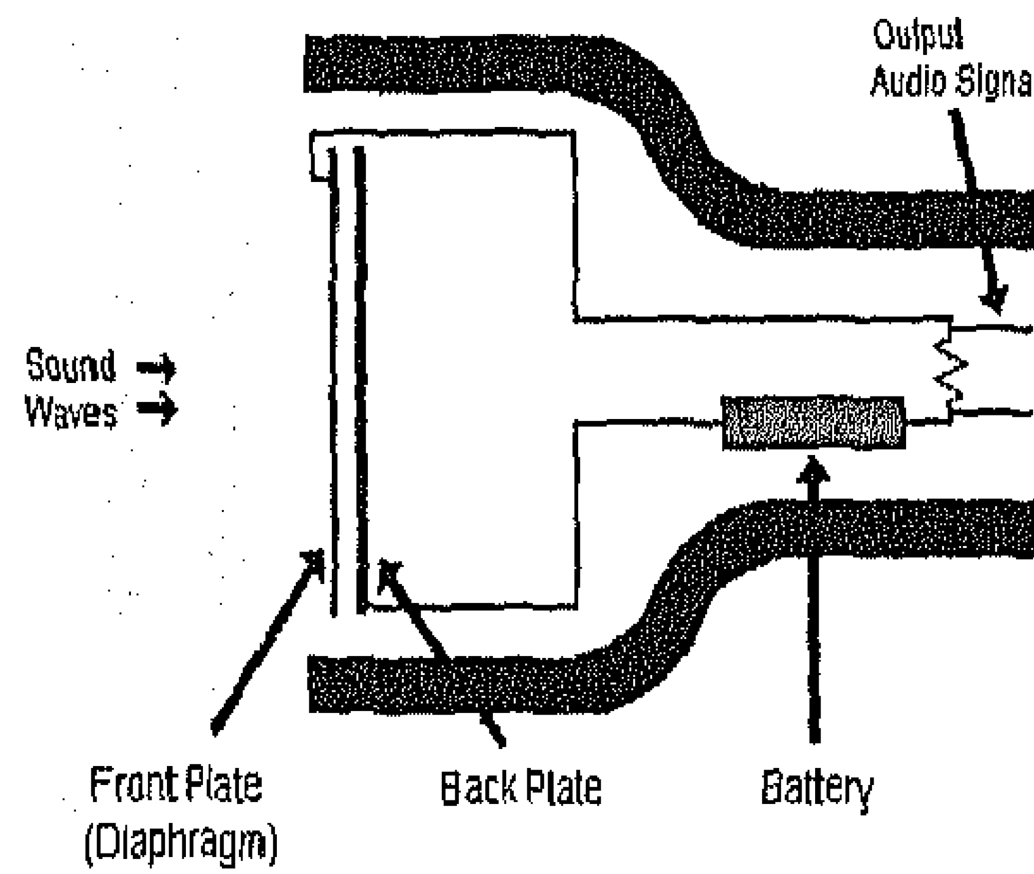
الميكروفونات (Microphones)

تستخدم الميكروفونات كمصوغ لتحويل الإشارات الصوتية إلى إشارات كهربائية وذلك من خلال الاستفادة من الطاقة الحركية الموجودة في الموجات الصوتية. لقد تم تصنيع أول ميكروفون على يد جراهام بل في عام 1876م وذلك لاستخدامه في نظام الهاتف الذي اخترعه وهو مكون من كبسولة صغيرة مكعبة الشكل بوجهين معدنيين يتم وصل سلكين معدنيين بهما ووجه على شكل غشاء رقيق أما بقية الأوجه فمن مواد عازلة ويتم ملئ الكبسولة بحبيبات من الفحم ولذا يسمى هذا النوع بالميكروفون الكربوني (carbon microphone). وعندما تسقط الموجة الصوتية على الغشاء فإنه يهتز تبعا للإهتزازات الصوتية مغيرة بذلك درجة إنضغاط الحبيبات الفحمية وبالتالي مقاومتها التي تغير قيمة التيار الكهربائي المار من خلالها وبذلك فإن

قيمة التيار المتغير الناتج تتناسب مع ضغط الهواء الناتج عن الصوت عند كل لحظة زمنيـــة. ومـــن ســـيئات الميكروفون الفحمي أن استجابته للترددات الصوتية غير ثابتة بل تقل بشكل كبير مع زيادة التردد ولذلك فهـــو لا يصلح إلا في التطبيقات التي لا تحتاج كامل الترددات الصوتية التي تمتد من ثلاثين هيرتز إلى 20 ألف هيرتز كما في أجهزة الهاتف حيث لا يتجـــاوز التـــردد 3300 هيرتز. وفي العشرينات والثلاثينيات من القرن العشـــرين ظهرت أنواع مختلفة من الميكروفونـــات كـــالميكروفون الحركي وميكروفون المكثف وميكرفون البلـــورة . ففـــي الميكروفون الحركـــي (dynamic microphone) يـــتم تثبيت ملف كهربائي ميكانيكيا بمنتصف الغشاء وبحيـــث يتحرك الملف في المجال المغناطيسي لمغنـــاطيس دائـــم وعندما يهتز الغشاء وكذلك الملف نتيجة للاهتزازات الصوتية فإن جهدا كهربائيا سيتولد في الملف تبعا لقانون الحث الكهربائي. ويتميز هذا النوع باستجابته الواسعة للترددات وحساسيته العالية وعدم حاجته لمصدر طاقـــة كهربائية لتشغيله كما في الميكروفون الفحمي.



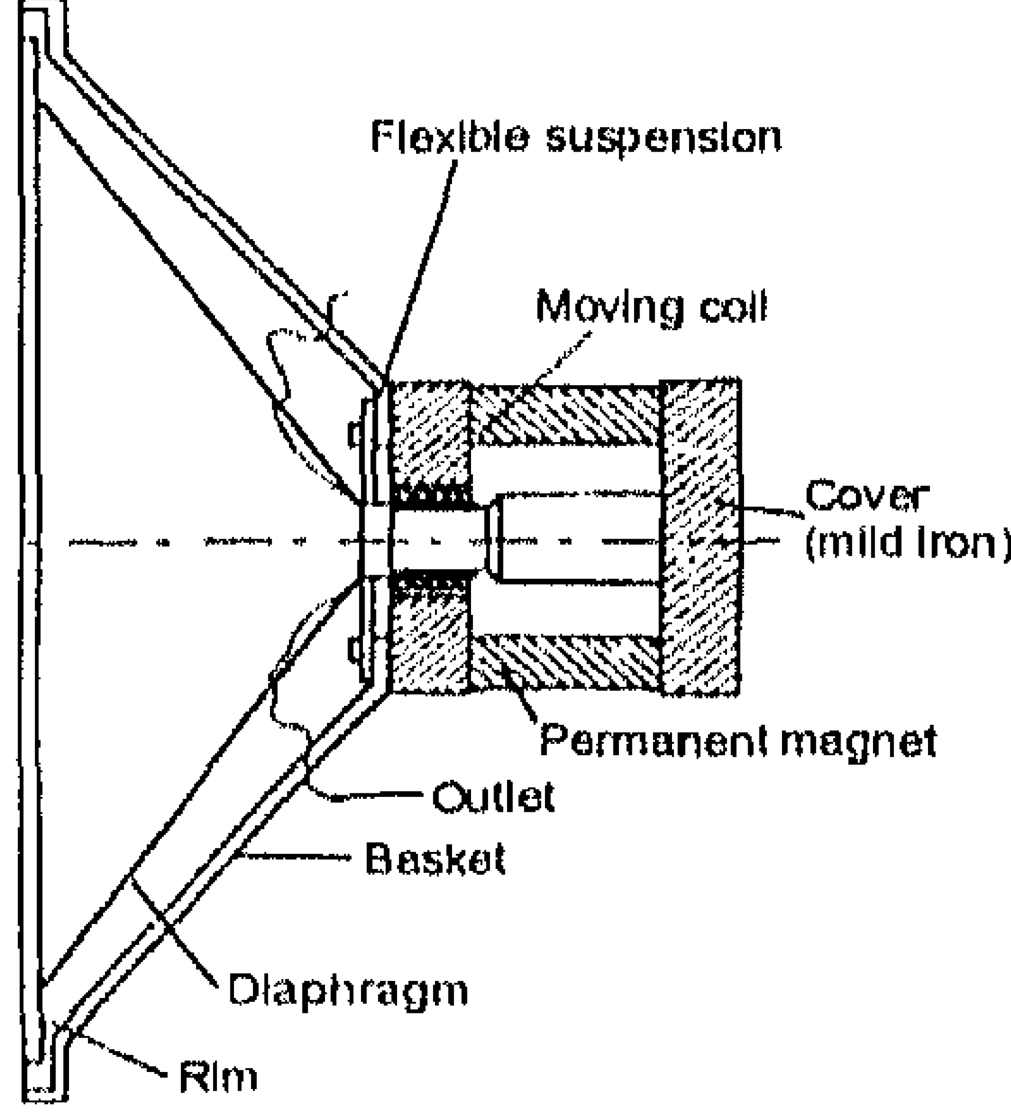
أما ميكروفون المكثف (condenser microphone) فيتكون من لوحين معدنيين يوضعان علـــى شكل مكثف بعازل هوائي أحدهما ثابت والأخر مكون من غشاء معدني رقيق قابل للاهتزاز ويتم تسليط جهـــد كهربائي ثابت من خلال مقاومة على هذا المكثف ليتم شحنه. وعند اهتزاز الغشاء المعـــدني نتيجـــة للموجـــة الصوتية الساقطة عليه فإن المسافة بين اللوحين ستتغير وبالتالي تتغير قيمة مواسعة المكثف فيبدأ بالشـــحن أو التفريغ من خلال المقاومة ليحافظ على نفس قيمة الجهد عند طرفية ويتم أخذ الإشارة الكهربائية المتغيرة من على طرفي المقاومة. أما ميكرفون البلـــورة (crystal microphone) فيتكون من بلورة طويلة نسبيا من الكوارتز أو الســـيراميك يثبت أحد طرفيها بينما يتم ربط الطرف الثـــاني بمنتصـــف الغشاء وعندما يهتز الغشاء نتيجة للاهتزازات الصوتية تهتز معه البلورة فينتج بين جانبيها فرق في الجهد نتيجة لظـــاهرة الكهروضـــغطية (Piezoelectric effect) المعروفـــة.

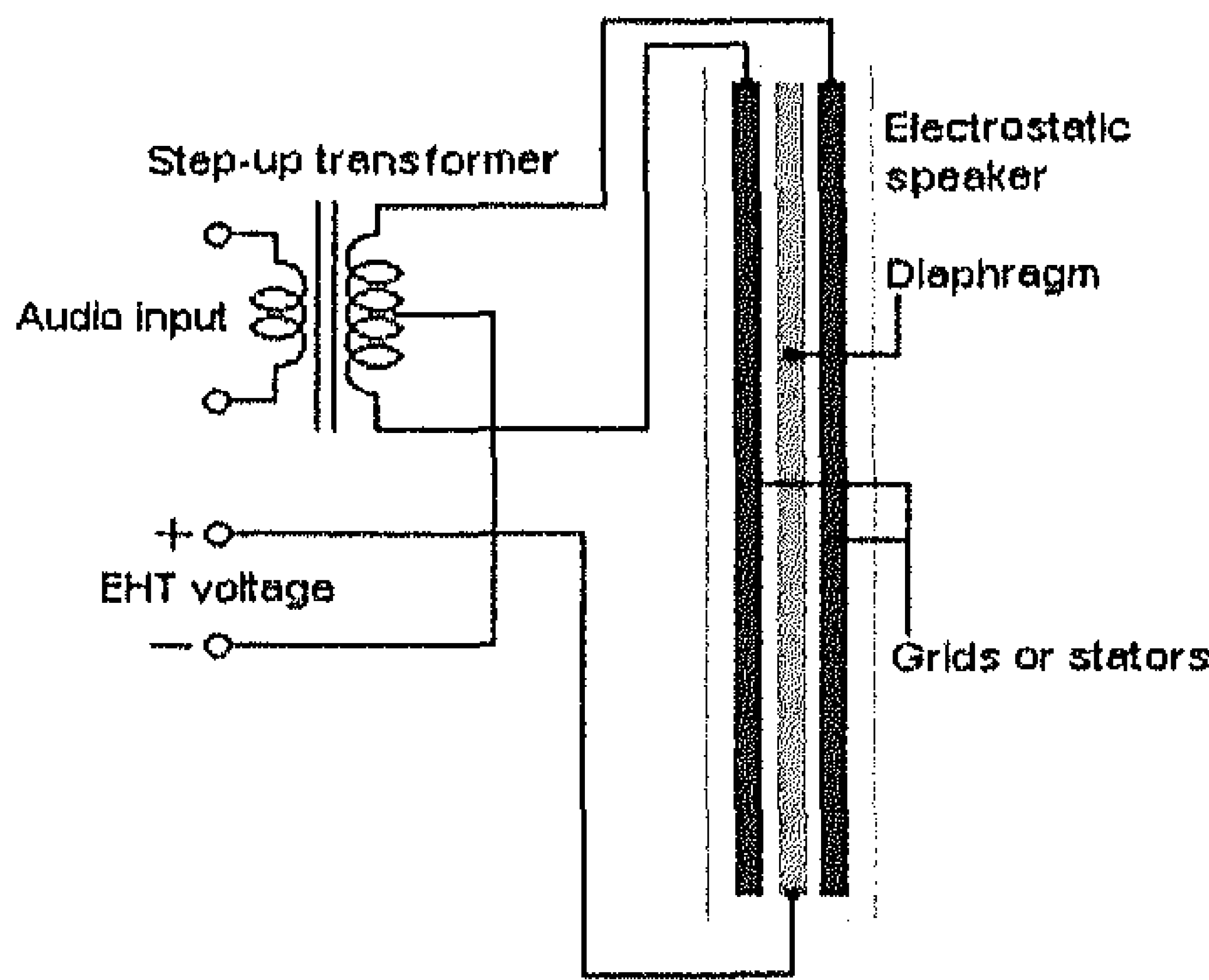


وفي الأربعينات ظهر نوع آخر مـــن ميكروفونـــات المكثـــف يســـمى الميكروفـــون الكهريتـــي (electret microphone) وفي هذا النوع يصنع الغشاء المكون لأحد لوحي المكثف من مادة تحتـــوي علـــى شـــحنات كهربائية بشكل دائم تسمى الكهريت (electrit) على غرار المغناطيس (magnet) وبذلك يتم الاستغناء عـــن الجهد الكهربائي المسلط على المكثف في حالة ميكروفون المكثف. وبما أن الشحنة ثابتة على المكثـــف فـــإن تغيير المسافة بين لوحيه نتيجة لاهتزاز الغشاء ستغير من قيمة مواسعته وبالتالي قيمة الجهد عند طرفيـــه. إن ظاهرة الكهريت موجودة في كثير من المواد الطبيعية والصناعية كالمواد الشمعية والبلاستيكية ويتم إنتاج مادة الكهريت من خلال تبريد مثل هذه المواد في مجال كهربائي عالي جدا تبلغ شدته عدة آلاف فولت للســـنتيمتر الواحد. وتوجد طريقة أخرى لإنتاج مواد الكهريت وهي من خلال وضع شحنات سالبة في قلـــب مـــواد ذات عزل عالي جدا كالتفلون (Teflon) فتحفظ بهذه الشحنات لفترات زمنية طويلة تصل لعشرات السنوات.

السماعات (Loudspeakers)

تقوم السماعات بعكس عمل الميكروفونات حيث تقوم بتحويل الإشارات الكهربائية الحاملة للصوت إلى موجات صوتية تنتشر في الهواء وقد تم اختراع أول سماعة على يد جراهام بل في عام 1876م وذلك لاستخدامه في نظام الهاتف الذي اخترعه. إن أشهر أنواع السماعات هي السماعة الحركية (dynamic loudspeaker) والتي لها تركيب مشابه لتركيب الميكروفون الحركي حيث تتكون من ملف كهربائي مثبت في منتصف غشاء له شكل مخروطي ويتحرك الملف بحرية في مجال مغناطيسي دائم أو كهربائي. وعند تمرير التيار الكهربائي المتغير الحامل للإشارة الصوتية في الملف فإن المجال المغناطيسي الذي يولده سيتفاعل مع المجال المغناطيسي الدائم إما بالتجاذب أو التنافر وذلك حسب اتجاه التيار وشدته فيهتز بذلك الملف مع الغشاء المرتبط به تبعا للاهتزازات الكهربائية وسينتج عن اهتزاز الغشاء اهتزاز للهواء المحيط به منتجا الموجات الصوتية. وفي منتصف الخمسينات من القرن العشرين ظهر نوع جديد من السماعات وهي السماعات الكهروستاتيكية (electrostatic loudspeakers) وهي أخف وزنا وأقل حجما من السماعات الحركية بسبب غياب المغناطيس فيها. وتتكون هذه السماعات من لوحين معدنيين مثقبين يوجد بينهما لوح ثالث رقيق جدا من البلاستيك المطلي بمادة موصلة كالجرافيت يعمل كغشاء ومثبت عند حوافه بإطار عازل بينما يترك وسطه ليهتز بحرية في الفراغ الواقع بين اللوحين المعدنيين. ويتم تسليط جهد ثابت قد يصل لعدة آلاف فولت بين الغشاء من طرف واللوحين المعدنيين من طرف آخر بينما يتم تسليط الجهد المتغير الحامل للإشارة الصوتية بعد رفع قيمته بشكل كبير من خلال محول بين اللوحين المعدنيين مما يسبب في اهتزاز الغشاء تبعا لاتجاه وشدة الجهد المتغير مصدرا بذلك الموجة الصوتية التي تنفذ إلى الخارج من خلال فتحات اللوحين المعدنيين. وظهرت أنواع أخرى من السماعات ولكن ليست بشهرة السماعات الحركية والكهروستاتيكية كالسماعات البلورية (crystal loudspeakers) والشريطية (ribbon loudspeakers) .





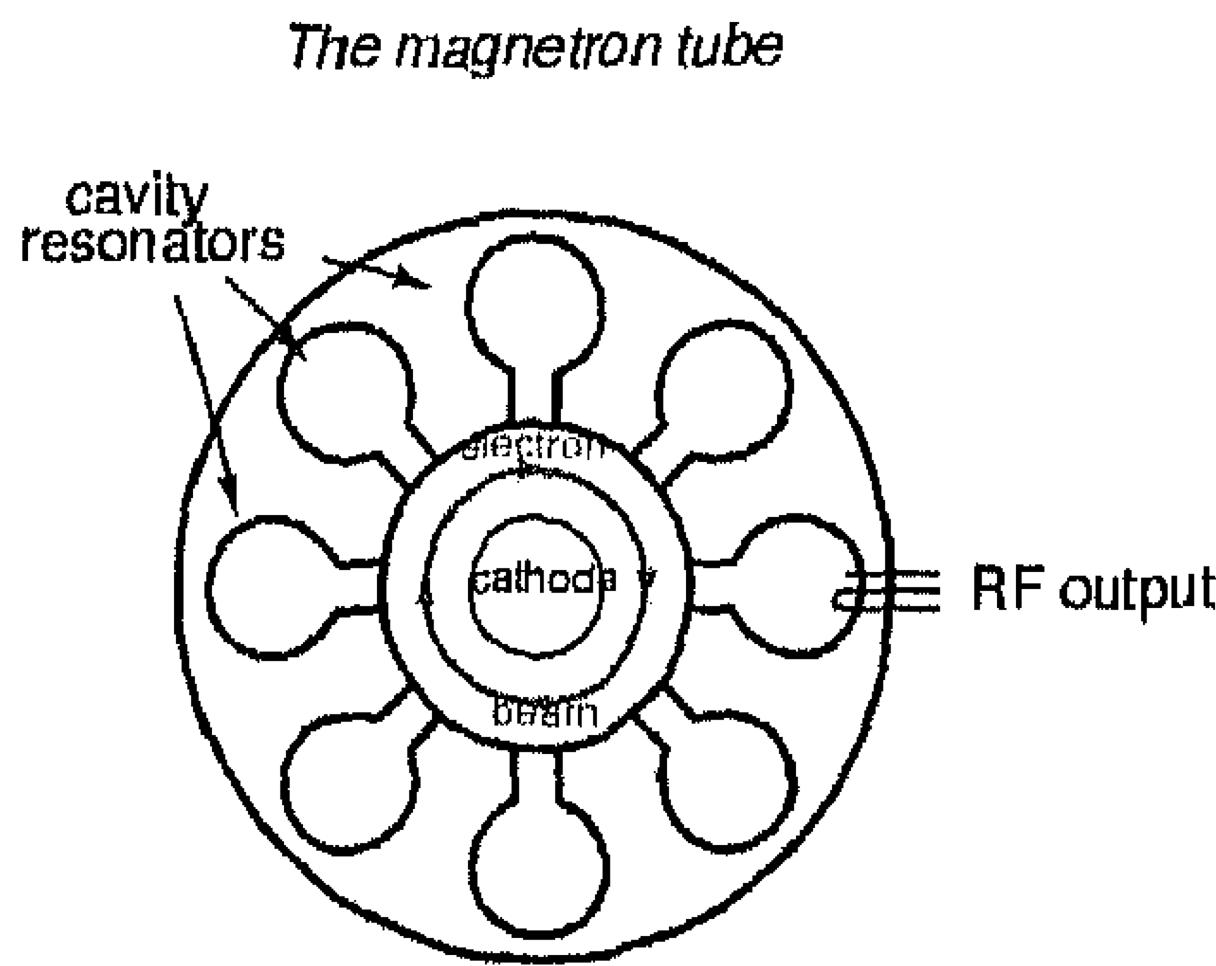
وتعتبر معاوقة السماعة (loudspeaker impedance) من أهم المعاملات التي يجب تحديدها عند تصميم السماعات حيث يتطلب أن تكون معاوقة خرج المضخم الذي يغذيها مساويا لمعاوقتها وذلك لنقل أكبر كمية من القدرة من المضخم للسماعة وتتوفر معظم أنواع السماعات بقيمتين للمعاوقة وهي ثمانية أومات وهي الأكثر شيوعا وأربعة أومات. ومن الخصائص التي يجب مراعاتها عند اختيار السماعة هو ما يسمى باستجابتها الترددية (frequency response) فالسماعة المثالية هي التي تصدر بنفس المستوى جميع الترددات التي تسمعها الأذن البشرية التي تمتد من ثلاثين هيرتز إلى 20 ألف هيرتز ولكن السماعات العملية

تتفاوت تفاوتا كبيرا في استجابتها الترددية فبعضها يغطي الترددات الدنيا وبعضها الوسطى وبعضها العليا من طيف الترددات الصوتية وذلك تبعا لنوع السماعة وجودة تصنيعها. وتتوفر السماعات بأحجام وقدرات مختلفة فمنها الصغيرة التي تستخدم في أجهزة الراديو والهواتف الخلوية والمسجلات وبقدرات تبدأ من أجزاء الـواط الواحد والكبيرة جدا التي تستخدم في المساجد والكنائس والمسارح ودور السينما وقد تصـل قـدراتها لمئـات الواطات.

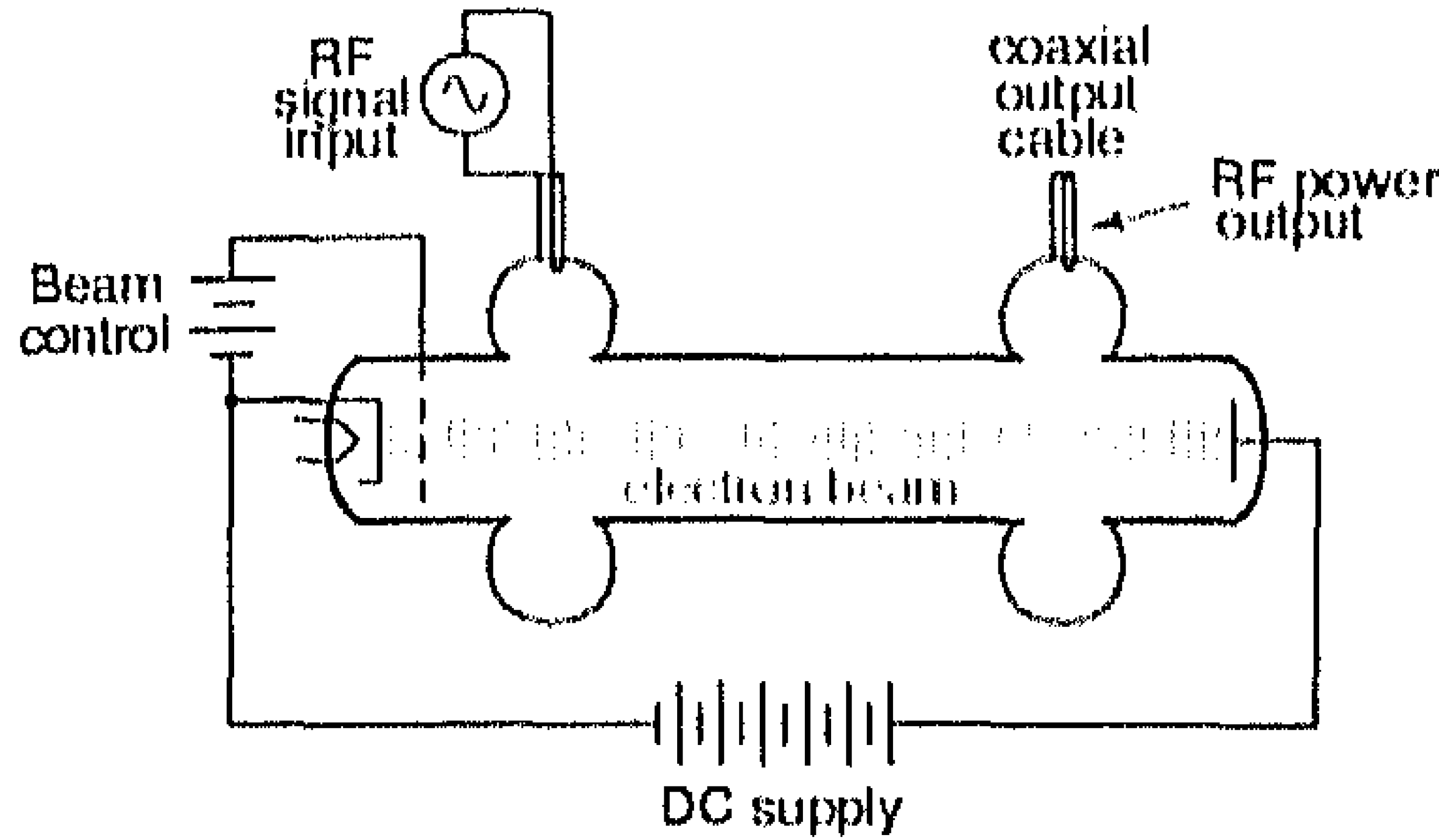
4-9 إلكترونيات الموجات الدقيقة والإلكترونيات الضوئية وإلكترونيات القوى

إلكترونيات الموجات الدقيقة (Microwave Electronics)

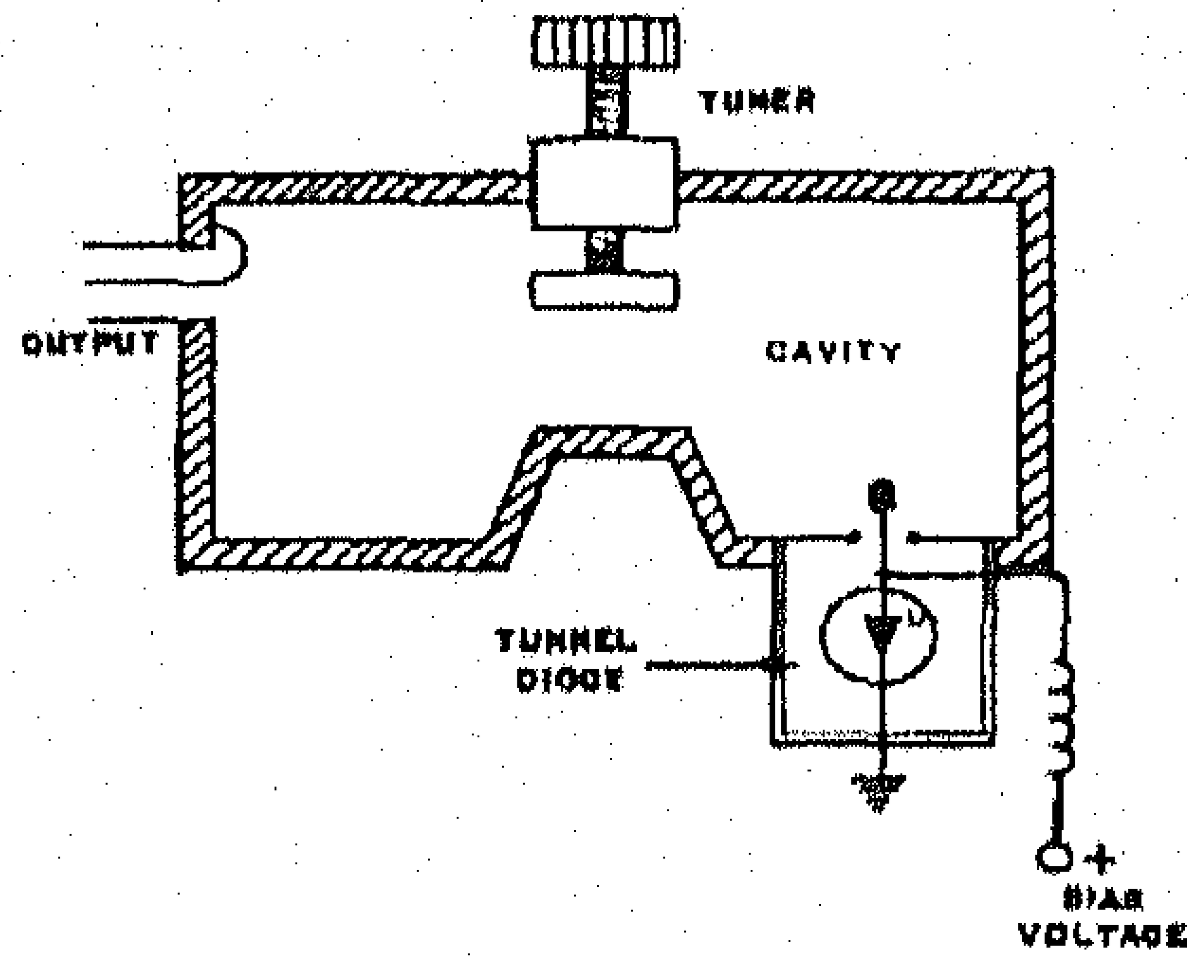
لقد أدرك مهندسو الاتصالات الكهربائية منذ البداية أهمية الترددات العاليـة فـي حمـل إشـارات المعلومات فقد تبين لهم أنه كلما زاد تردد الحامل كلمـا زادت كمية المعلومات التي يحملها حيث يمكن أن يصل عرض نطاق الإشارة المحمولة إلى عشرة بالمائـة مـن قيمة تردد الحامل. ولكن الدافع الأكبر وراء البحث عـن مذبذبات قادرة على توليد ترددات عالية كان لأغـراض أنظمة الرادار فقد ظهـرت فكـرة اسـتخدام الموجـات الكهرومغناطيسية لكشف الأهداف مع اكتشاف الأمـواج الكهرومغناطيسية في عام 1887م علـى يـد الفيزيـائي الألماني هنيرتش هيرتـز (Heinrich Hertz) والـذي اكتشف أيضا أن هذه الأمواج تنعكس عند اصطدامها بالأجسام المعدنية والعازلة بدرجات متفاوتة. وفي عـام 1903م تمكن المهندس الألماني كريستيان هولسماير (Christian Hulsmeyer) من إجراء تجربـه تمكـن من خلالها كشف وجود سفينة بوجود الضباب باستخدام الموجـات الكهرومغناطيسـية ولكـن دون تحديـد المسافة. ولقد تبين للمهندسين العاملين في مجال أنظمة الرادار أنه كلما زاد التردد كلما كان بالإمكان توجيـه الموجات على شكل شعاع ضيق وذلك باستخدام الهوائيات وبالتالي زيادة دقة تحديد اتجـاه الهـدف. وإلـى جانب التردد العالي فإن أنظمة الرادار تتطلب مذبذبات بقدرات عالية جدا حيث أن الموجات المرتـدة عـن الأهداف تكون في غاية الضعف ولا بد في هذا الحال من زيادة قدرة المرسل لتمكين المستقبل مـن كشـف الأهداف البعيدة حيث تصل قدرة المرسل إلى عدة مئات من الكيلوواط. لقد تم استخدام الصـمام الإلكترونـي الذي تم اختراعه في عام 1906م لتوليد ترددات بدأت في نطاق الترددات المنخفضة ثم المتوسطة ثم العالية ولكن محاولات المهندسون باءت بالفشل في تصميم مذبذبات باستخدام الصمامات العادية قادرة على توليـد ترددات بعدة مئات من الميجاهيرتز وكذلك بقدرات عالية لأغراض الرادار. ويعود السبب في ذلك إلـى أن وجود الأسلاك التي تربط بين مكونات الدائرة الإلكترونية تعمل كهوائيات تقوم ببث الإشارات خـارج هـذه الدائرة مما يجعلها تفشل بالقيام بالوظيفة التي صممت من أجلها إلى جانب تأثير المكثفات والملفات الشـاردة التي لا يمكن تفادي وجودها في الصمامات والوصلات التي تربط بينها.



ولذلك فقد بدأ المهندسون في البحث عن مكونات إلكترونية غير الصمامات العادية لتوليد الترددات فوق العالية أو ما أطلق عليها اسم الموجات الدقيقة أو الميكروويف وبهذا ظهر ما يسمى بإلكترونيات الموجات الدقيقة. لقد تم تعريف الموجات الدقيقة على أنها الموجات الكهرومغناطيسية التي تتراوح تردداتها بين واحد جيقاهيرتز (ألف ميجاهيرتز) وثلاثمائة جيقاهيرتز أي أن طول موجاتها لا يتجاوز الثلاثين سنتيمتر. وبسبب قصر طول موجاتها فإن الأسلاك العادية لا يمكنها حمل مثل هذه الترددات حيث أنها تعمل كهوائيات تقوم بإشعاع طاقة هذه الترددات بالكامل بعد مسافة قصيرة من سيرها عليها أما الكوابل المحورية فإن بعض أنواعها قادر على نقل الترددات الدنيا من طيف الموجات الدقيقة ولكنها غير قادرة على نقل بقية الترددادت بسبب الفقد الكبير فيها ولهذا فإن



مرشدات الأمواج (waveguides) هي الوسيلة السلكية المستخدمة لنقل الموجات الدقيقة. وكذلك هو الحال مع الهوائيات السلكية فإنها غير قادرة على بث واستقبال الموجات الدقيقة بكفاءة ولذلك فقد تم استخدام الهوائيات البوقية والصحنية (horn & dish antennas) بدلا منها. وفي عام 1921م تمكن الأمريكي ألبرت هول (Albert Hull) من اختراع أول أنواع مولدات الموجات الدقيقة المسمى بالمجنيترون (Magnetron) وهو مذبذب قادر على توليد ترددات عالية جدا وقد تم تطويره في عام 1939م على يد المهندسين البريطانيين جون راندال وهاري بووت (John Randall & Harry Boot) ليصبح أصغر حجما وبقدرات كبيرة جدا قد تصل لمئات الكيلوواطات. وفي عام 1937م تم اختراع أنبوب الكلايسترون (Klystron) على يد الأخوين سيقارد ورسل فاريان (Sigurd & Russell F. Varian) ويستخدم هذا الأنبوب كمذبذب ومضخم لترددات الموجات الدقيقة. وفي عام 1942م تم اختراع أنبوب الموجة المرتحلة (Traveling Wave Tube (TWT)) على يد المهندس النمساوي ردولف كومبفن

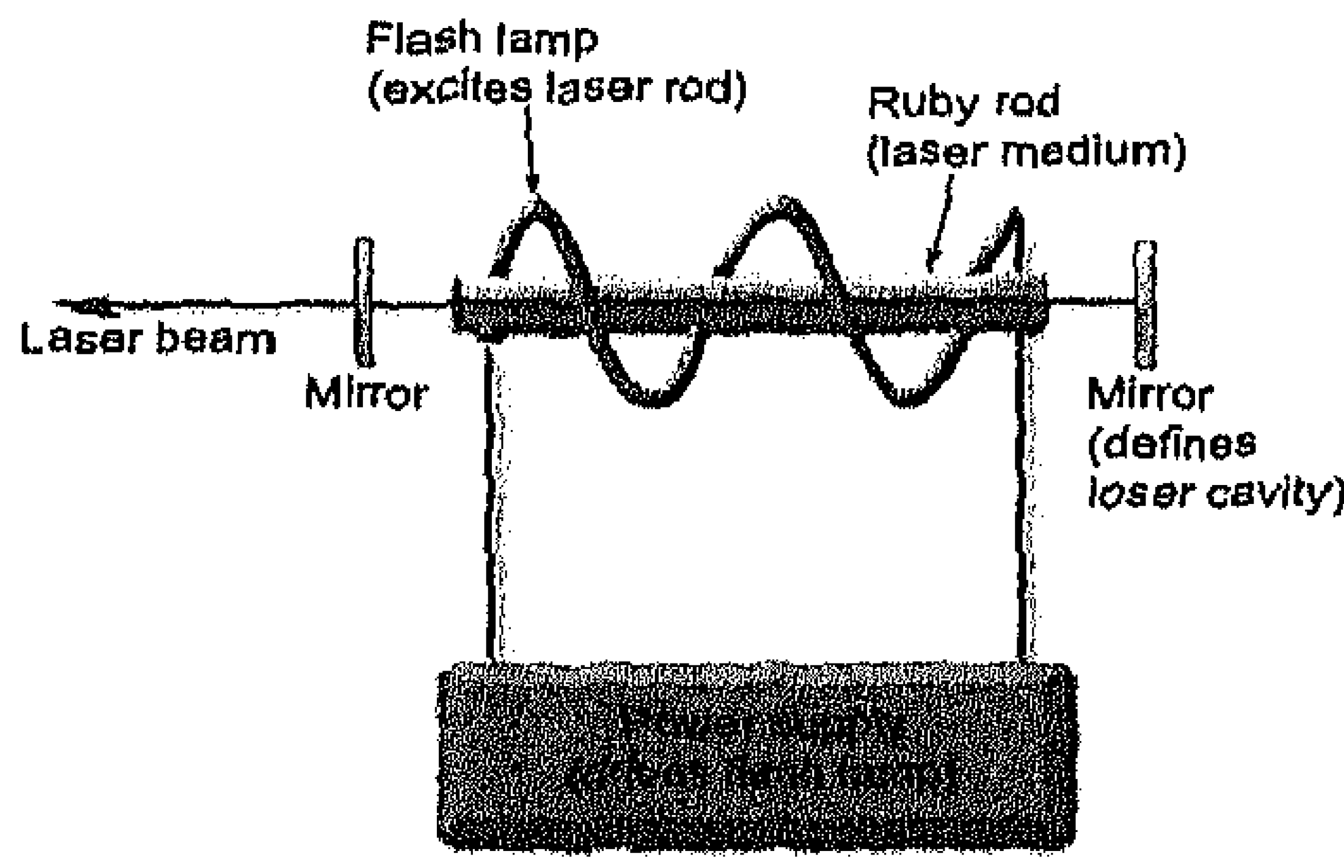


(Rudolf Kompfne) والذي يستخدم في الغالب كمضخم للإشارات وخاصة في أنظمة اتصالات الأقمار الصناعية بسبب عرض نطاقه الواسع. ويعتمد مبدأ عمل هذه الأجهزة في الغالب على تفاعل شعاع من الإلكترونات يتم توليده بدائرة مهبطية مع مجال الموجة الكهرومغاطيسية المراد توليدها أو تضخيمها فيتم بذلك نقل طاقة الإلكترونات إلى الموجة فتزيد بذلك طاقتها. وعادة ما يتم هذا التفاعل داخل فجوة رنين (resonant cavity) تحدد أبعادها قيمة التردد الذي يعمل عنده المذبذب أو المضخم.

ومع اختراع المجنيترون والكلايسترون ذات الترددات والقدرات العالية بدأت أنظمة الرادار الحديثة بالظهور واستخدمت بكثرة أبان الحرب العالمية الثانية. وقد تم استخدام الموجات الدقيقة في أنظمة الاتصالات في نهاية الأربعينات من القرن العشرين وزاد استخدامها مع ظهور أنظمة اتصالات الأقمار الصناعية في بداية الستينات. وعلى العكس من أنظمة الرادار فإن أنظمة الاتصالات لا تتطلب قدرات عالية

ولذلك فقد تم التوجه بعد اختراع الترانزستور في عام 1947م لاستخدام الترانزستورات والثنائيات لتوليد وتضخيم الموجات الدقيقة. لقد تم تصميم أنواع خاصة من الترانزستورات بنوعيها أحادي وثنائي القطبية تستخدم المواد شبه الموصلة المركبة كزرنيخيد القاليوم لكي تعمل كمذبذبات ومضخمات في نطاق الموجات الدقيقة. ومع اكتشاف ظاهرة المقاومة السلبية (negative resistance) في كثير من أنواع الثنائيات تم الاستفادة منها في تصنيع أنواع مختلفة من المذبذبات العاملة في مختلف مناطق الموجات الدقيقة وبقدرات متفاوته ولكنها لا ترقى لتلك التي في الأنابيب. ومن الثنائيات المستخدمة الثنائيات النفقية (Tunnel Diodes) والتي اخترعها الياباني ليونا إيساكي (Leona Esaki) في عام 1958م وثنائيات قن (Gunn diode) والتي اخترعها الإنكليزي جون قن (John Gunn) في عام 1963م وكذلك الثنائيات المسماة (IMPATT diode). وتخدم إلكترونيات الأمواج الدقيقة كامل قطاع أنظمة الرادار وأنظمة الأقمار الصناعية وأنظمة الموجات الدقيقة الأرضية وأنظمة الهواتف الخلوية وأفران الميكروويف ولأغراض تشخيص ومعالجة الأمراض.

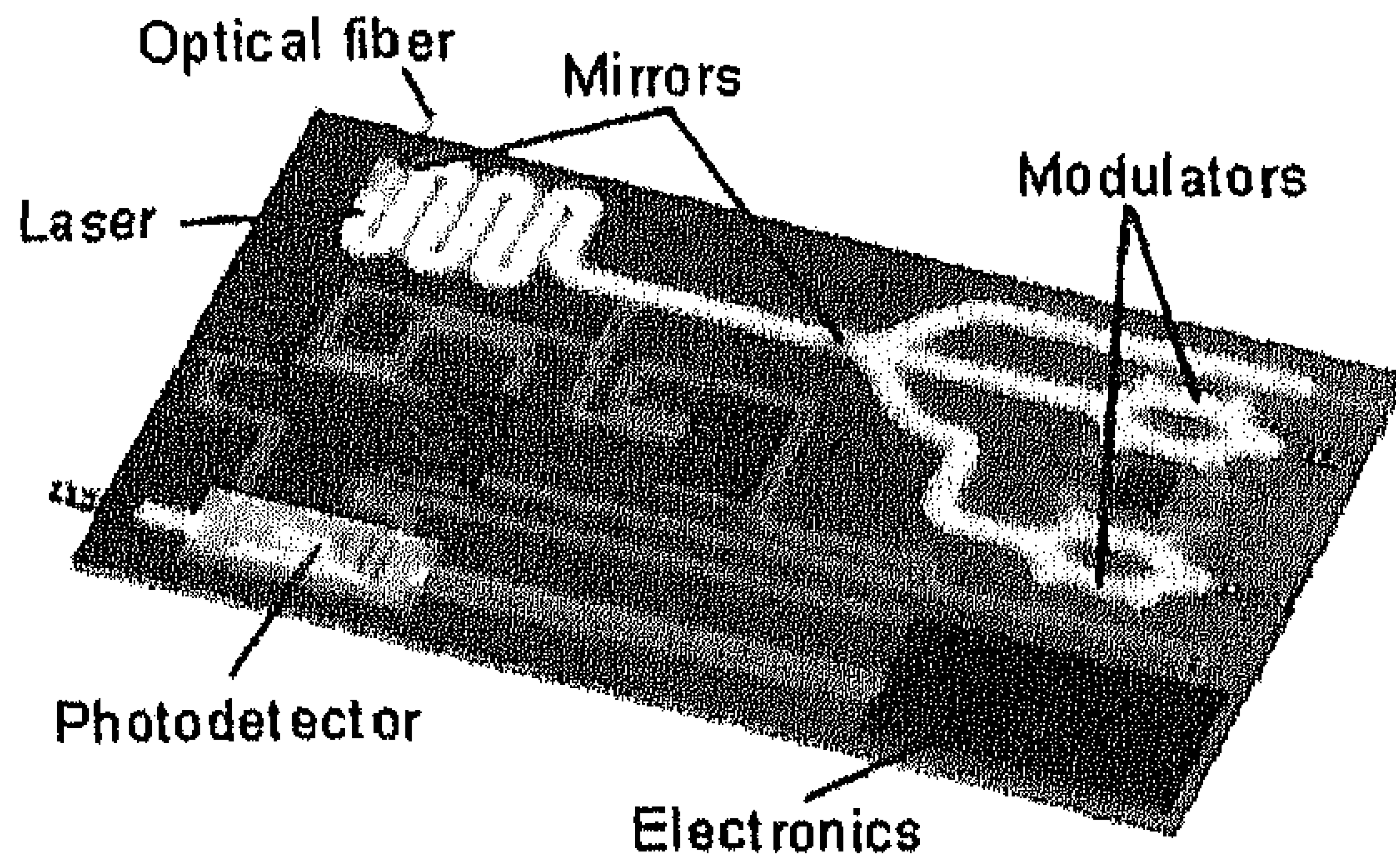
الإلكترونيات الضوئية (Optoelectronics)



لقد أدى اختراع الليزر في عام 1960م على يد الفيزيائي الأمريكي ثيودور ميمان (Theodore Maiman) إلى فتح ابواب لا حصر لها من التطبيقات ذات الأهمية البالغة في حياة البشر المعاصرة. والليزر هو عبارة عن مذبذب ضوئي يقوم بتوليد نوع مميز من الضوء يختلف في خصائصه عن الضوء الطبيعي والضوء الصادر عن مختلف أنواع المصابيح الكهربائية. إن الضوء الصادر عن الليزر يكون على شكل شعاع له مقطع عرضي متناهي في الصغر وشدة إضاءة قد تزيد بملايين المرات عن شدة الضوء الصادر عن الشمس أو المصابيح الكهربائية ولهذا فيمكن لشعاع الليزر أن يسير لمسافات طويلة جدا دون أن يخبو ضوءه. أما الخاصية الثانية فهي أن ضوء الليزر يتكون من حزمة ضيقة جدا من الترددات بعكس أنواع الضوء الأخرى التي تتكون من طيف واسع من الترددات ولذا تبدو للعين كضوء ابيض يحتوي على جميع ألوان الطيف المرئي بينما يبدو ضوء الليزر بلون واحد عالي النقاء. لقد كان أول ما فكر به المهندسون هو استخدام ضوء الليزر كحامل لإشارات المعلومات كبديل عن الموجات الراديوية بسبب قدرته على حمل كميات معلومات تفوق بملايين المرات الحاملات الراديوية بسبب ارتفاع تردد الضوء. وقد تمكنت إحدى الشركات الأمريكية في عام 1975م من إجراء أول تجربة ميدانية ناجحة لنظام اتصالات ضوئي باستخدام الألياف الزجاجية.

ومع النجاح الباهر الذي حققته أنظمة الاتصالات الضوئية في مجال الاتصالات واستخدامه كعمود فقري في الشبكة العالمية للمعلومات (الإنترنت) ظهرت صناعة ضخمة في مجال الإلكترونيات الضوئية تقوم بتصنيع مختلف أنواع المصادر الضوئية كالليزرات بأنواعها المختلفة والباعثات الضوئية (Light Emitting Diodes (LED)) والكاشفات الضوئية (Photodiodes) وكذلك المضخمات الضوئية

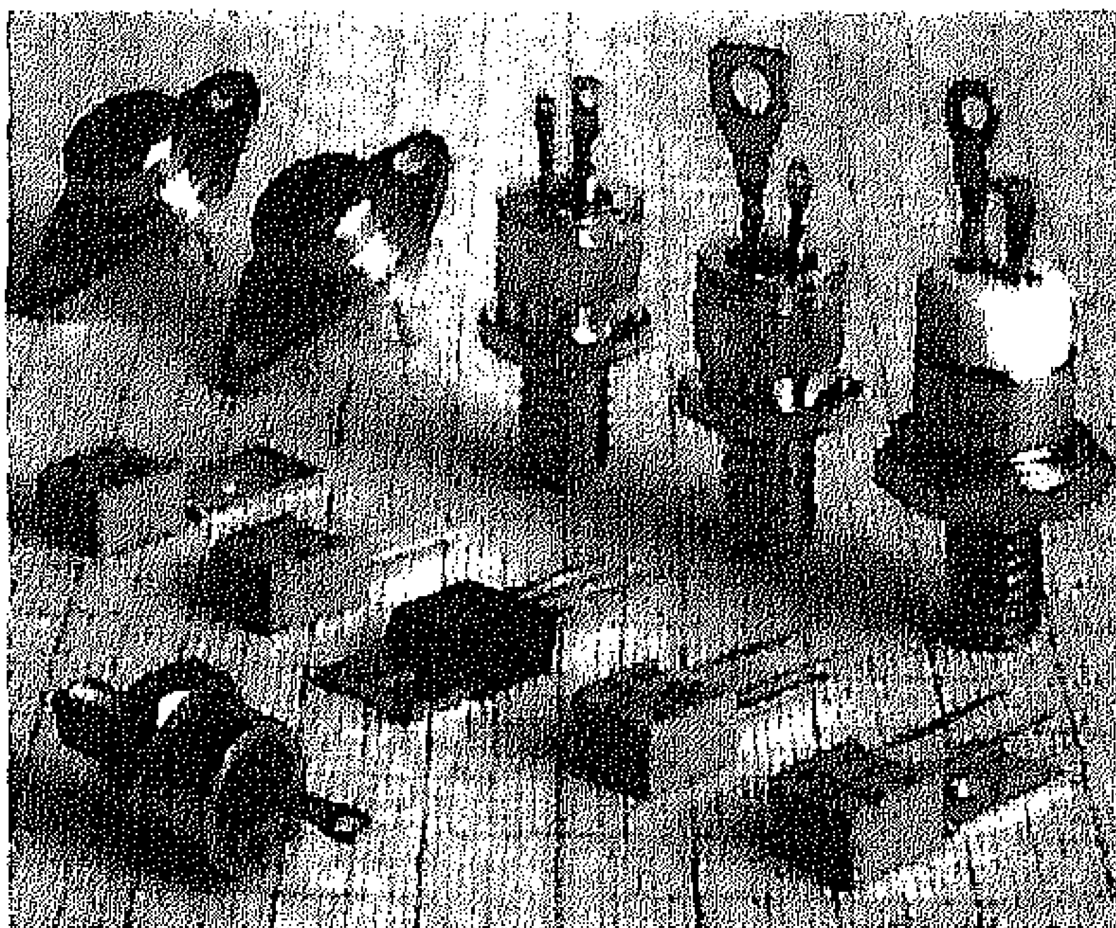
والمرشحات الضوئية (Optical Amplifiers) (FiltersOptical) ودوائر التعديل والـدمج الضـوئية (Optical modulators & mixers). ولم يتوقف دور الإلكترونيـات الضـوئية علـى خدمـة قطـاع الاتصالات بل تعداه لقطاع الحواسيب حيث تم استخدام الليزرات والكاشفات الضـوئية شـبه الموصـلة فـي الأقراص الضوئية التي تقوم بتخـزين كميات ضخمة من المعلومات تفـوق بكثير الأقراص المغناطيسـية وفـي الطابعات وآلات التصوير الليزريـة وكذلك في الحواسيب الضوئية التـي تستخدم الضوء بدلا مـن الكهربـاء



لمعالجة وتخزين المعلومات والتي لا زالت قيد الدراسة والبحث. ويستخدم الليزر مع المكونات الأخرى فـي أنظمة المساحة لتحديد البعد وفي الصناعة لقطع ولحام وتشكيل المعادن وفي التطبيقـات العسـكرية لتوجيـه الصواريخ والقذائف وتدمير الأهداف وفي الرادارات الضوئية لتحديد المسـافة والسـرعة. ويسـتخدم فـي المتاجر لقراءة الباركود المثبت على السلع لإدخال أسعارها بطريقة تلقائية إلى آلة المحاسبة وفي الطب فـي أجهزة تصحيح النظر وحفر الأسنان وفي معالجة الأمراض الجلدية وكذلك في الأجهزة المخبرية وإلى غيـر ذلك من التطبيقات التي لا حصر لها. ويمكن للقارئ الرجوع للفصل العاشر لمزيد من التفصـيلات عـن الليزر وتطبيقاته المختلفة.

إلكترونيات القوى (Power Electronics)

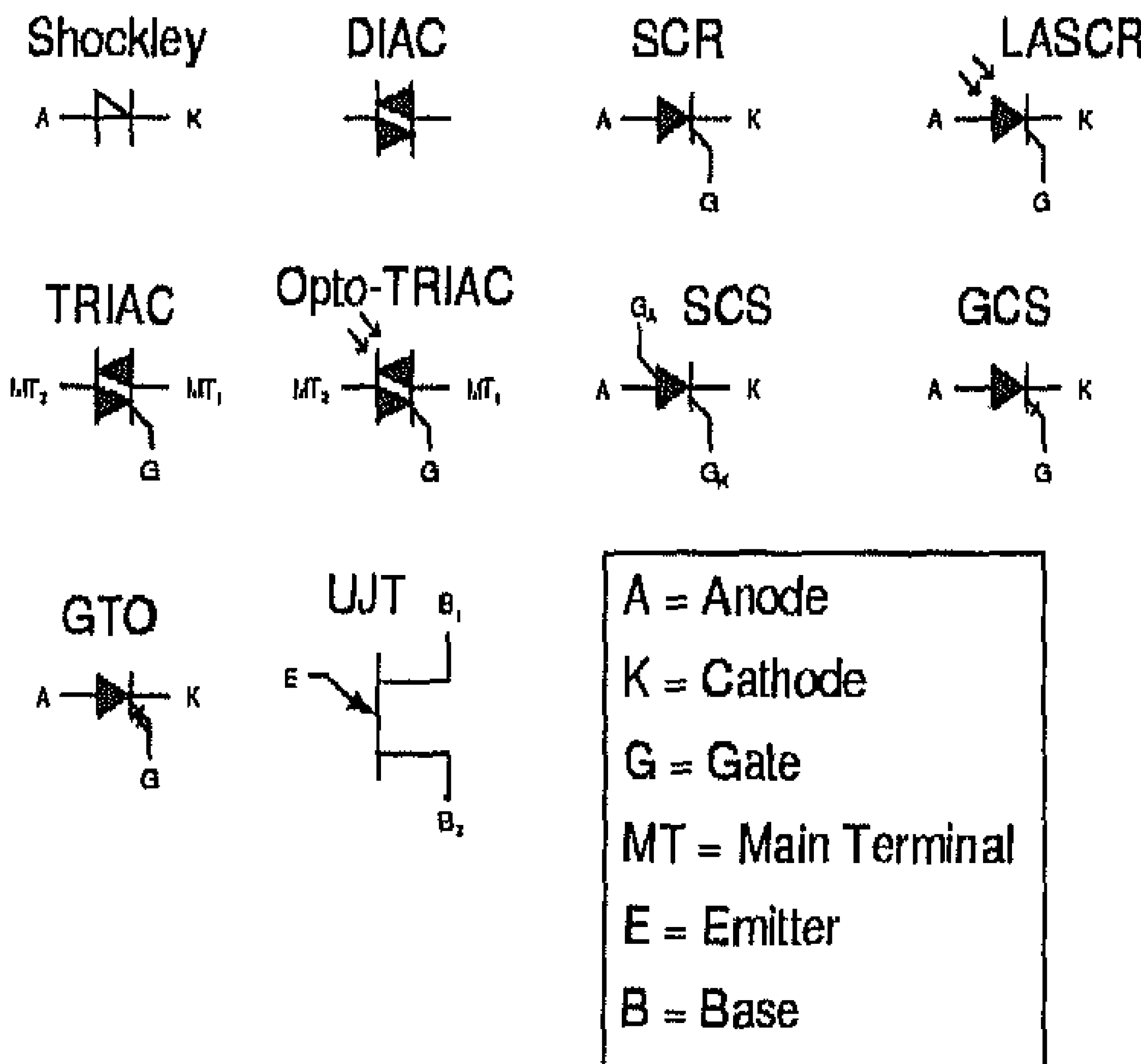
تحتاج الأجهزة والمعدات الكهربائية والإلكترونية أنواع وقيم مختلفة من الجهـود والتيـارات لكـي تعمل على الوجه الأكمل فبعض هذه الأجهزة لا تعمل إلا بالتيـارات المتناوبـة (Alternating Current AC) وبعضها لا يعمل إلا بالتيارات المباشرة (Direct Current DC) وبقيم تتراوح بـين عـدة فولتـات وآلاف الفولتات وكذلك الحال مع التيارات. وبما أن مصدر الطاقة الكهربائية الرئيسي المتوفر للمسـتخدمين هو على شكل تيار متناوب بجهد 110 فولت وتـردد 60 هيرتز في النظام الأمريكي وبجهد 220 فولت وتردد 50 هيرتز في النظام الأوروبي فإنه يلزم وجود دوائر كهربائية وإلكترونية تعمل على تحويل هذه الجهـود إلـى الجهـود المطلوبة. ويوجد أربعة أنواع رئيسية مـن هـذه الـدوائر فالنوع الأول يقوم بتحويل التيار المتناوب إلى تيار مباشـر وهو ما يسمى بالمقومات (rectifiers) وغالبا ما تستخدم المحولات الكهربائية لخفض أو رفـع الجهـد للمسـتوى



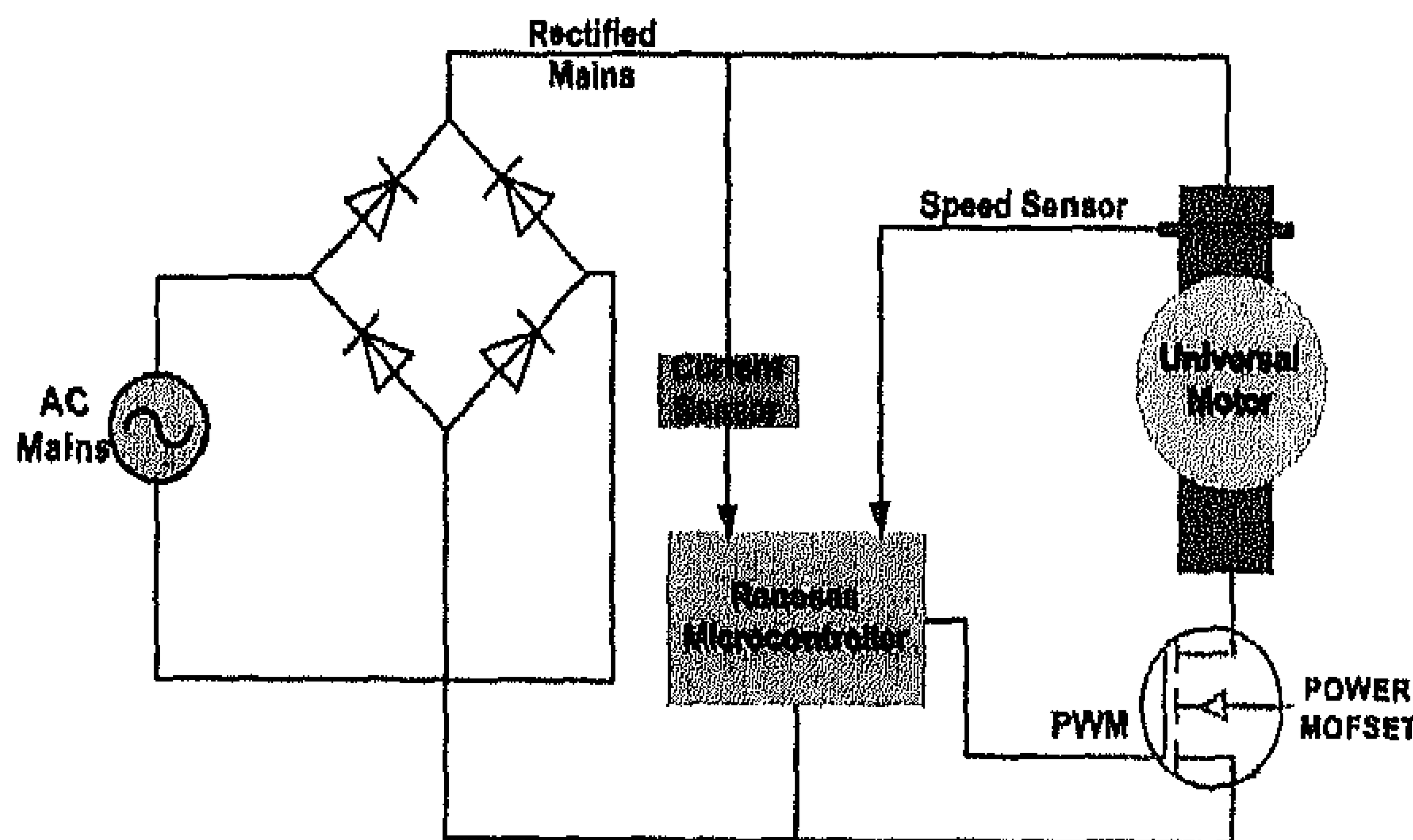
المطلوب والثنائيات العادية لإجراء عملية التقويم. وتستخدم المقومات في جميع الأجهزة التـي لا تعمـل إلا بالتيار المباشر كالتلفزيونات والراديوات والمسجلات والحواسيب غيرها بوجود مصدر تيار متناوب وغالبـا

ما يكون المقوم موجودا في داخل هذه الأجهزة. أما النوع الثاني فيقوم بتحويل التيار المباشر إلى تيار متناوب وهو ما يسمى بالعواكس (inverters) وتستخدم العواكس لتغذية الأجهزة التي لا تعمل إلا بالتيار المتناوب كمصابيح النيون ومحركات التيار المتناوب من مصدر تيار مباشر كالبطاريات.

إن أكثر استخدامات العواكس هو في وحدات مصادر كهرباء الطوارئ التي تغذي المستشفيات والبنوك ومراكز الحاسوب وغيره بالطاقة الكهربائية عند انقطاع الكهرباء وذلك من البطاريات التي سبق شحنها من شبكة الكهرباء العامة وكذلك في مزودات الطاقة غير المنقطعة (uninterruptible power supply (UPS) المستخدمة في غرف العمليات الجراحية وفي مراكز الحاسوب وغيرها من الأجهزة التي يلزم أن تبقى عاملة ولا تتأثر بانقطاع كهرباء الشبكة العامة. وتستخدم العواكس كذلك في تحويل الطاقة الكهربائية التي تولدها الخلايا الشمسية وهي من نوع التيار المباشر إلى طاقة كهربائية بتيار متناوب تغذى بها شبكة الكهرباء العامة. أما النوع الثالث فيقوم بتحويل التيار المباشر إلى تيار مباشر بمستوى أعلى أو أقل وهو ما يسمى بالمقطعات (chopping) ويستخدم هذا النوع في الأجهزة والمعدات الكهربائية التي تحتاج لعدة مستويات من الجهد لتغذية مكوناتها المختلفة من مصدر تيار مباشر بمستوى جهد واحد كالبطاريات وذلك كما في الحواسيب والتلفزيونات والأقمار الصناعية والمركبات الفضائية ومعدات المختبرات الطبية والبحثية. أما النوع الرابع فيقوم بتحويل التيار المتناوب إلى تيار متناوب بتردد مختلف وهو ما يسمى بمحولات التردد (cycloconversion) ويستخدم هذا النوع في الغالب في أنظمة التحكم بسرعات المحركات وفي أنظمة التسخين بالموجات الراديوية. تستخدم هذه الأنواع من المحولات إلى جانب الثنائيات العادية ثنائيات تم تطويرها لهذه الأغراض وتسمى ثنائيات السيليكون المحكومة (Silicon Controlled Rectifiers (SCR)). وفي هذه الثنائيات يوجد طرف ثالث غير طرفي الثنائي العادي وهما المصعد والمهبط يستخدم في فتح وإغلاق هذا الثنائي من خلال تسليط نبضات كهربائية عليه.



ومن أشهر الثنائيات المحكومة الثنائيات المسماة بالثايرستورات (thyristors) والثايرستور عبارة عن جهاز إلكتروني تم اختراعه في عام 1957م مكون من أربعة طبقات من المواد شبه الموصلة المطعمة على شكل مناطق موجب-سالب-موجب-سالب ويتم وصل المصعد بالمنطقة الموجبة الخارجية والمهبط بالمنطقة السالبة الخارجية ويتم وصل قطب جديد



يسمى البوابة بالمنطقة الموجبة الداخلية. وإذا ما تم تسليط جهد موجب على المصعد بالنسبة للمهبط فإن التيار لن يسري في الثايرستور إلا من خلال قدح البوابة بنبضة جهد كهربائي لمدة قصيرة وبمجرد سريان التيار فيه فإنه لن يتوقف حتى مع إزالة الجهد عن البوابة إلا إذا هبطت قيمة التيار عن قيمة محددة تسمى تيار الإمساك. ويوجد نوع آخر من الثنائيات المحكومة وهو الترياك (TRIAC) وهو يختلف عن الثايرستور أنه يسمح بمرور التيار في الاتجاهين عند قدح البوابة بينما لا يسمح الثايرستور بمرور التيار إلا من المصعد إلى المهبط. ومن خلال استخدام دوائر إلكترونية لتوليد نبضات التحكم المسلطة على بوابات الثايرستورات والدياكات والتراياكات يمكن تصميم وبناء مختلف أنواع الأجهزة المستخدمة في إلكترونيات القدرة. وعادة ما تستخدم المتحكمات الدقيقة لتوليد نبضات التحكم والتي تكون على شكل نبضات لها مستوى ثابت من الجهد ولكن يتم تغيير إما عرض (width) وإما تردد هذه النبضات بما يسمى تعديل عرض النبضات ((Pulse Width Modulation (PWM)).

الفصل الخامس

أنظمة الاتصالات

5-1 تمهيد

لقد حققت أنظمة الاتصالات الكهربائية للبشر كثيرا من الأماني والأحلام التي كان مجرد التفكير بها يعتبر ضربا من الخيال فحطمت بذلك حاجز المسافات بينهم فأصبح يكلم بعضهم بعضا بالهواتف الثابتة أو المحمولة وهم على بعد مئات وآلاف الكيلومترات ويتحاورون وجه لوجه من خلال الشاشات التلفزيونية والهواتف المرئية ويشاهدون للتو ما يقع في هذا العالم من أحداث من خلال مئات المحطات التلفزيونية. وكذلك يرسلون رسائلهم ومستنداتهم في ثواني معدودة من خلال أجهزة الفاكس والبريد الإلكتروني ويطالعون الكتب والمجلات والصحف وينجزون أعمالهم المكتبية ومعاملاتهم المالية والتجارية وهم في بيوتهم وأماكن عملهم من خلال شبكات المعلومات وشبكة الإنترنت. ولم يقتصر دور أنظمة الاتصالات على نقل المعلومات السمعية والمرئية والمقروءة بل تعداها إلى تطبيقات بالغة الأهمية فاستخدموها في أنظمة التحكم والقياس والمراقبة والاستشعار لنقل الإشارات بين مختلف الأجهزة والمعدات الموجودة في الطائرات والقطارات والصواريخ والتلسكوبات الفضائية والأقمار الصناعية ومحطات الأرصاد الجوية والمفاعلات النووية والمحطات الفضائية والمصانع والمستشفيات. وأستخدمت كذلك في أنظمة الملاحة المختلفة كالرادارات وأنظمة تحديد الموقع وأنظمة الاستهداء والتوقيت لتسهيل حركة الطائرات والسفن وناقلات النفط والقطارات والمركبات وتجنيبها كثيرا من المشاكل كالتصادمات والاختناقات والضياع. إن ثورة الاتصالات والمعلومات لم تكن لتصل إلى ما وصلت إليه لولا مجموعة اكتشافات واختراعات تم إنجازها على مدى قرنين من الزمن كاكتشاف الكهرباء في عام 1800م والتلغراف في عام 1837م والتلفون في عام 1871م والموجات الكهرومغناطيسية في عام 1890م والمقسم الآلي في عام 1891م وأنبوب الأشعة المهبطية في عام 1897م والصمام الإلكتروني في عام 1906م والتلفزيون في عام 1928م والحاسوب في عام 1945م والترانزستور في عام 1947م والدائرة المتكاملة في عام 1958م والليزر في عام 1960م والليف الزجاجي في عام 1967م والمعالج الدقيق في عام 1971م.

ولقد لعب الترانزستور دور البطل في هذه الثورة خصوصا بعد أن تم تصنيع أعداد كبيرة منه على شريحة صغيرة من السيليكون بما يسمى بالدائرة المتكاملة مما ساعد على تصنيع أجهزة إلكترونية ذات قدرات عالية وأحجام صغيرة وقليلة الاستهلاك للطاقة. لقد ارتبط تطور أنظمة الاتصالات والمعلومات ارتباطا وثيقا بتقنية الدوائر المتكاملة فلولاها لكان حجم الهاتف النقال الذي نضعه اليوم في جيوبنا بحجم خزانة كبيرة فيما لو صنع من الترانزستورات المنفردة وبحجم عدة غرف فيما لو صنع من الصمامات الإلكترونية ولقد وصل عدد الترانزستورات على الدائرة المتكاملة الواحدة حاليا إلى ما يزيد عن عشرة ملايين ترانزستور بعد أن كان لا يتجاوز العشرة عند اختراعها. وإلى جانب الترانزستور والدائرة المتكاملة لعبت التقنية الرقمية دورا بارزا في ثورة الاتصالات والمعلومات فقد عملت على تحويل مختلف أشكال المعلومات إلى شكل واحد وهو سلسلة من النبضات ذات المستويين مما أدى إلى استخدام تقنية الإلكترونيات الرقمية كتقنية موحدة لتصنيع جميع أجهزة الاتصالات والمعلومات واستخدام نفس المعدات لنقل وتخزين

مختلف الإشارات الرقمية وأدى إلى إرسال المعلومات لمسافات بعيدة وبمعدل أخطاء منخفض وإلى ضغط المعلومات إلى درجات كبيرة.

لقد وفرت أنظمة الاتصالات والمعلومات للإنسان أكثر مما كانت تراوده بها أحلامه فبمقدوره اليوم أين ما كان موقعه على سطح هذه الأرض أن يتصل بمن يشاء بواسطة هاتف صغير يحمله في جيبه وأن يتابع بالصوت والصورة ما يقع من أحداث في هذا العالم من خلال معدات زهيدة الثمن يستقبل بها آلاف المحطات التلفزيونية التي تبثها الأقمار الصناعية المعلقة في السماء. وبإمكانه أن يتصفح من خلال جهاز الحاسوب والهاتف ما يريد من معلومات مخزنة في عدد لا يحصى من المواقع المبعثرة في جميع أنحاء العالم وسيكون بمقدوره في القريب العاجل أن يحادث من يشاء بالصوت والصورة من خلال الهاتف المرئي الذي سيحل محل هاتفه الصوتي. لقد أصبحت وسائل الاتصالات ومصادر المعلومات من الكثرة بمكان بحيث بدأ المرء يحار في توفير الوقت اللازم لاستيعاب هذا الكم الهائل من المعلومات المتوفرة بين يديه وتمنى لو أن عينيه وأذنيه لهما القدرة على إدخال المعلومات إلى عقله بمعدلات أعلى مما هي عليه أو أن يكون طول يومه غير طوله الذي هو عليه! إن السيناريو المتوقع لما ستكون عليه تقنية الاتصالات والمعلومات في غضون السنوات القادمة هو وجود شبكة عالمية واحدة للمعلومات تشكل الألياف الضوئية والأقمار الصناعية العمود الفقري لها وسيكون بمقدور الإنسان أن يستلم المعلومات المختلفة إما لاسلكيا بواسطة الأقمار الصناعية وشبكات الهواتف الخلوية وهو خارج منزله أو سلكيا بواسطة الألياف الضوئية وهو في منزله. وسيكون لكل فرد في المجتمع جهازان جهاز صغير بحجم الكف يحمله في تجواله ويستخدمه كهاتف مرئي يحادث به من يشاء بالصوت والصورة أو كتلفزيون يشاهد به مختلف المحطات التلفزيونية أو كحاسوب يتصل من خلاله بشبكة الإنترنت. أما جهازه البيتي فسيقوم بنفس المهام التي يقوم بها جهازه اليدوي ولكن بقدرة أكبر للتعامل مع شبكة الإنترنت وبشاشة أكبر لإظهار صور تلفزيونية عالية الوضوح وذلك لقدرة الألياف الضوئية على ضخ كميات ضخمة من المعلومات بالمقارنة مع الأقمار الصناعية والهواتف الخلوية. لقد بدأت كلفة استخدام شبكات المعلومات تنخفض بشكل كبير جدا في السنوات الأخيرة بسبب القدرة الهائلة للألياف الضوئية على نقل المعلومات وسيؤدي هذا الانخفاض إلى انتشار خدمات كثيرة كانت تحول دون تنفيذها الكلفة العالية لقنوات الاتصال كخدمة التعلم والتعليم عن بعد والتطبب عن بعد والعمل عن بعد وإنجاز المعاملات عن بعد والسياحة عن بعد حيث سيتم تثبيت كميرات تلفزيونية على أبراج مطلة على الأماكن السياحية المهمة ويتم ربطها على شبكات الإنترنت ليشاهدها من يشاء.

2-5 أساسيات أنظمة الاتصالات الكهربائية

تعمل أنظمة الاتصالات على جمع ونقل وتوزيع مختلف أشكال المعلومات بسرعة الضوء بين مصادر المعلومات ومواردها والتي تتراوح المسافة بينها بين عدة أمتار وقد تصل إلى مئات الملايين من الكيلومترات كما في أنظمة اتصالات استكشاف الفضاء. ويمكن تقسيم أنظمة الاتصالات إلى أربعة أنواع رئيسية وهي أنظمة الشبكات وأنظمة البث وأنظمة التراسل وأنظمة جمع المعلومات. فأنظمة الشبكات تتكون من عدد كبير من المشتركين بحيث يمكن لأي مشترك منهم الاتصال بأي مشترك آخر على الشبكة لتبادل المعلومات معه شريطة أن يكون لكل مشترك عنوانه المحدد كما في شبكات الهاتف والتلكس والحاسوب والإنترنت. أما أنظمة البث فتقوم ببث المعلومات من مرسل واحد فقط إلى عدد كبير من المستقبلات كما في

أنظمة البث الإذاعي والتلفزيوني الأرضي والفضائي. أما أنظمة التراسل فتقوم بنقل المعلومات بين نقطتين ثابتتين أو متحركتين كأنظمة الكوابل المحورية والألياف الزجاجية والأقمار الصناعية والموجات الدقيقة. وأما أنظمة جمع المعلومات فتعمل على جمع المعلومات من عدد كبير من المرسلات الموزعة جغرافيا واستقبالها في مركز واحد كأنظمة الرصد الجوي والرادارات وأنظمة الحماية والمراقبة.

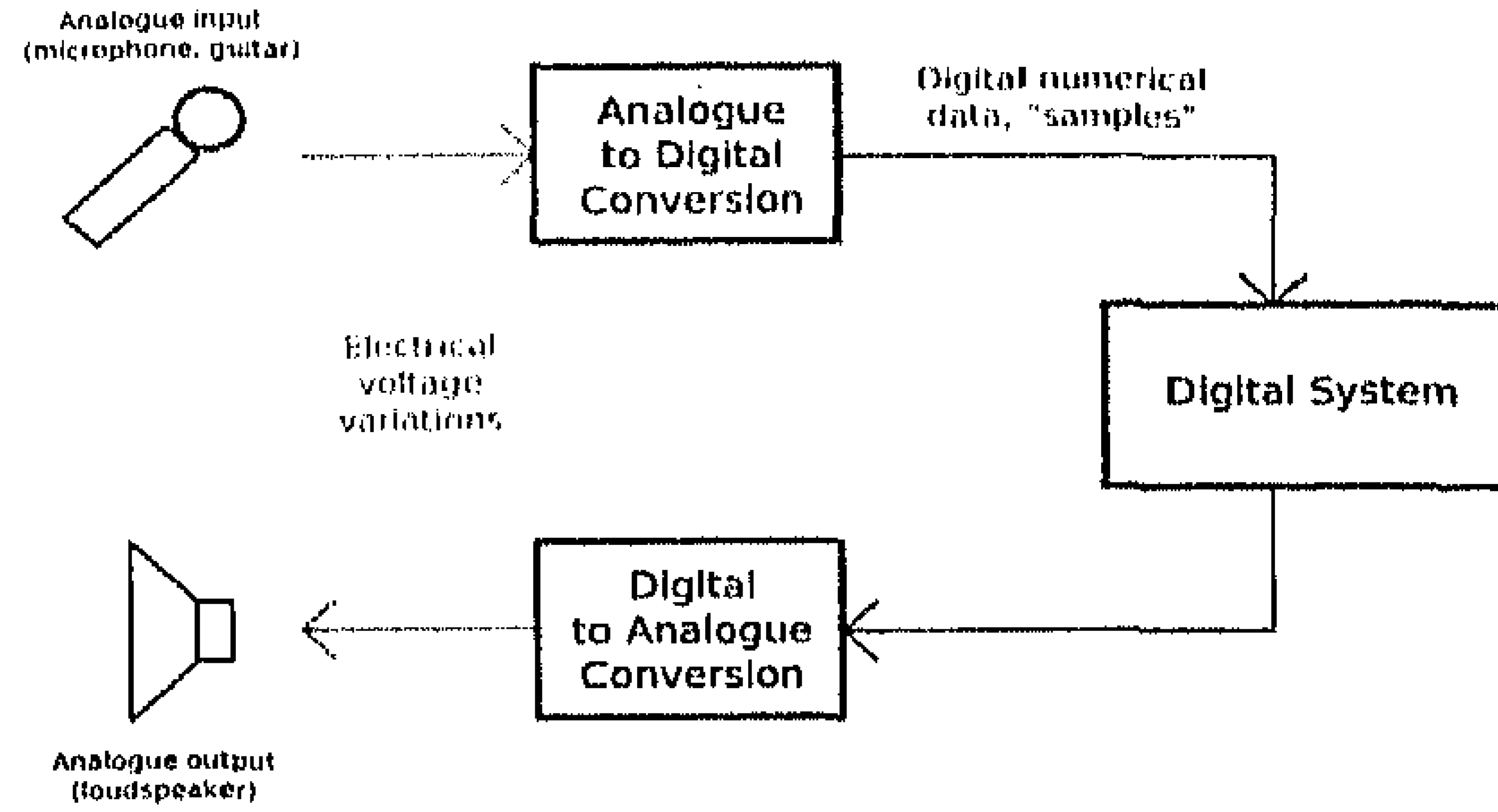
أنواع المعلومات وطرق تمثيلها

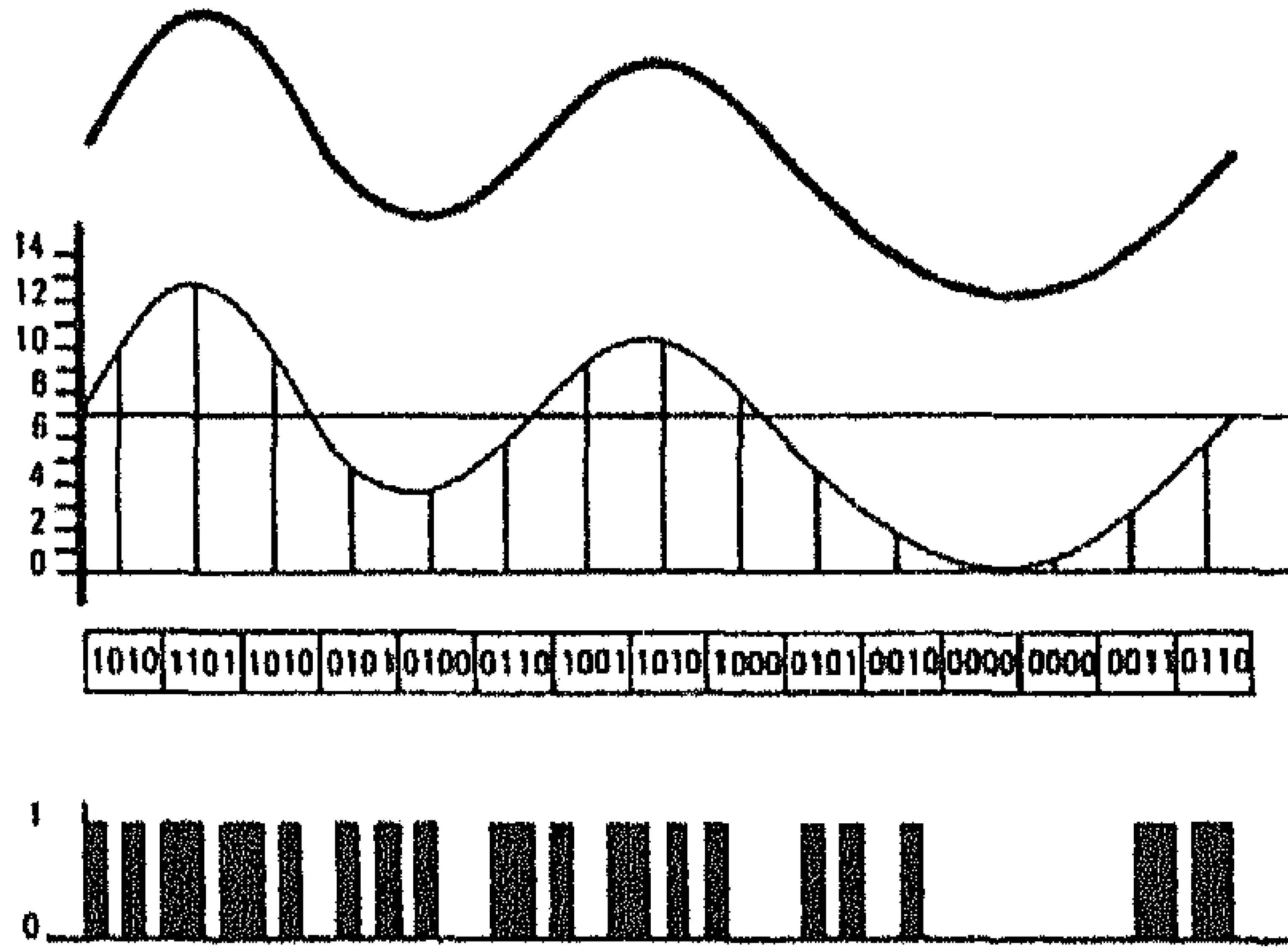
لقد فضل الله الإنسان على كثير من مخلوقاته بقدرته على التعلم والتفكير والعمل وزوده بحواس يستطيع من خلالها جمع المعلومات من المحيط الذي يعيش فيه وبعقل قادر على تخزين ومعالجة هذه المعلومات وبجوارح قادرة على إخراج المعلومات بأشكال مختلفة كالنطق والكتابة والتأشير والرسم والعمل. ولقد تم تقسيم إشارات المعلومات إلى أربعة أنواع رئيسية وهي الإشارات السمعية (audio signals) وتشمل جميع الأصوات التي تسمعها الأذن البشرية والإشارات المرئية (video signals) وتشمل جميع المشاهد المتحركة التي يمكن للعين البشرية رؤيتها والإشارات المقروءة (text & graphic signals) وتشمل كل ما هو مكتوب أو مرسوم أو مصور وإشارات البيانات (data signals) وتشمل الإشارات التي تولدها الحواسيب وأجهزة القياس والتحكم والرادارات والمستشعرات بأنواعها المختلفة. ويتم تمثيل المعلومات كهربائيا من خلال تحويل الكمية الفيزيائية الحاملة للمعلومات إلى جهد أو تيار كهربائي باستخدام ما يسمى بالمصوغات (transducers) كالميكروفون وكميرة الفيديو اللذين يحولان شدة ضغط الهواء الناتج عن الصوت وشدة الضوء المنعكس عن المشهد إلى إشارات كهربائية. ويطلق على هذه الإشارات الكهربائية اسم الإشارات التشابهية (analog) لكونها تشبه إشارة المعلومات الأصلية من حيث أنها تأخذ عند كل لحظة زمنية قيمة محددة من بين عدد لامتناهي من القيم. ويعتبر عرض النطاق الذي تحتله إشارة المعلومات الكهربائية على طيف الترددات مقياسا تقريبيا لكمية المعلومات التي تحملها هذه الإشارة فعلى سبيل المثال يبلغ عرض نطاق الإشارة السمعية الهاتفية أربعة كيلوهيرتز بينما يبلغ في الإشارة التلفزيونية أربعة ميغاهيرتز أي أن كمية المعلومات في الإشارة المرئية تساوي ألف مرة تلك التي في الإشارة السمعية. وعلى الرغم من الدور الكبير الذي لعبته المعلومات في حياة الإنسان إلا أنه لم يتم وضع معايير لقياس كمياتها إلا في الأربعينات من القرن العشرين عندما قام العالم الأمريكي كلاود شانون (Claude Shannon) بوضع الأسس الرياضية لما يسمى بنظرية المعلومات (information theory) حيث أثبت أن كمية المعلومات في معلومة ما تتناسب عكسيا مع احتمالية حدوثها أي أنه كلما قلت احتماليتها كلما زادت كمية المعلومات فيها واستحدث وحدة لقياس المعلومات أسماها "البت" والتي تمثل كمية المعلومات المكتسبة عند وقوع حدث تبلغ احتمالية حدوثه خمسين بالمائة. لقد ساعدت نظرية المعلومات العلماء والمهندسين على إيجاد طرق وتقنيات متقدمة لنقل وتخزين وتشفير وضغط مختلف أنواع المعلومات مما أدى إلى مضاعفة كمية المعلومات المنقولة عبر قنوات الاتصال أو المخزنة في معدات التخزين وإلى إمكانية إرسال المعلومات لمسافات شاسعة قد تصل إلى مئات الملايين من الكيلومترات وإلى تقليل نسبة الخطأ في المعلومات المنقولة إلى مستويات متدنية. وعلى الرغم من بساطة أنظمة نقل الإشارات التشابهية إلا أنها معرضة للتلوث بشكل كبير بإشارات الضجيج التي يستحيل التخلص منها حال اندماجها معها مما يحد من إرسالها لمسافات بعيدة بسبب تراكم

إشارة الضجيج مع زيادة المسافة إلى جانب صعوبة ضغطها لكي تحتل حيزا أقل في قنوات الاتصال ومعدات التخزين وعدم إمكانية استخدام الحواسيب الرقمية لتخزينها ومعالجتها.

التقنية الرقمية (Digital Technology)

بدأ التفكير باستخدام التقنية الرقمية لتمثيل المعلومات بعد أن وضع الرياضي الإنكليزي إدموند ويتكار (Edmund Whittaker) أسس نظرية الإعتيان (sampling theory) في عام 1915م وكذلك بعد أن تمكن المهندس الأمريكي هاري نايكوست (Harry Nyquist) في عام 1928م من تحديد عدد العينات اللازم أخذها في الثانية لتمثيل الإشارة التشابهية الأصلية. لقد أكتشف نايكوست تجريبيا وأثبت ذلك نظريا فيما بعد العالم الأمريكي شانون أنه يكفي لنقل وتخزين الإشارة التشابهية أخذ عينات من هذه الإشارة بمعدل يجب أن يساوي أو يزيد عن معدل معين أطلق عليه اسم معدل نايكوست (Nyquist rate) والذي يساوي ضعف أعلى تردد في الإشارة الأصلية. وقد أثبت نايكوست كذلك أنه يمكن استرجاع إشارة المعلومات الأصلية بكاملها من خلال تمرير العينات المرسلة على مرشح تمرير منخفض (lowpass filter). فعلى سبيل المثال فإنه يكفي أخذ ثمانية آلاف عينة في الثانية لتمثيل إشارة المكالمة الهاتفية بينما نحتاج لأخذ عشرة ملايين عينة في الثانية لتمثيل الإشارات التلفزيونية. لقد ساعدت نظرية الإعتيان المهندسين على إرسال أكثر من إشارة على نفس قناة الاتصال وذلك من خلال إرسال عينات الإشارات المختلفة في الفراغات الزمنية الواقعة فيما بين عيناتها بما يسمى بتقنية تعاقب التقسيم الزمني (time division multiplexing (TDM)). أما الخطوة التالية المهمة في التقنية الرقمية فهي تحويل قيم العينات المأخوذة إلى شيفرات (codes) ذات أطوال محددة مكونة من سلسلة من الأرقام الثنائية (binary numbers) وهي الواحد والصفر حيث يطلق اسم "البت" على خانة الرقم الثنائي. ومن الواضح أنه كلما زاد طول شيفرة التمثيل كلما زادت دقة تمثيل قيم العينات وعادة ما يكفي شيفرة بطول ثماني بتات لتمثيل المعلومات في عينات الإشارات السمعية والمرئية وعليه فإنه يكفي أربع وستون ألف بت في كل ثانية لإرسال وتخزين الإشارات السمعية وتسعون مليون بت في كل ثانية للإشارات المرئية.





وقد كان المهندس البريطاني ألكس ريفس (Alex Reeves) أول من اقترح استخدام هـذا النظـام الرقمي والمسمي بتعديل التشفير النبضي (Pulse Code Modulation(PCM)) وذلك في عام 1937م وقد أثبت أيضا أن له حصانة كبيرة جدا ضد إشارات الضجيج (noise) مما يساعد على إرسال المكالمات الهاتفية إلى مسافات بعيدة وبدرجة نقاء عالية. إن عملية تحويل الإشارات التشابهية إلى إشارات رقمية تحتاج لـدوائر إلكترونية معقدة نسبيا وكان من الصعب بناء مثل هذه الدوائر باستخدام الصمامات الإلكترونية ولـذلك تـأخر استخدام هذه التقنية في نقل المكالمات الهاتفية حتى عام 1962م وذلك بعد استخدام الترانزستور في بناء هـذه الدوائر. ولكي يتم إرسال وتخزين الإشارات الرقمية يتم تحويلها إلى نبضـات كهربائيـة أو ضـوئية ذات مستويين أحدها يمثل الرقم واحد والآخر يمثل الرقم صفر وذلك باستخدام الدوائر الإلكترونية الرقميـة التـي يعمل فيها الترانزستور كمفتاح بسيط يقوم بفتح وإغلاق الدوائر الكهربائية. لقد أحدث التحول مـن النظـام التماثلي إلى النظام الرقمي ثورة في طرق توليد ونقل وتخزين ومعالجة المعلومات حيث تتميـز الإشـارات الرقمية بمقاومتها العالية لإشارات الضجيج لتعاملها مع مستويين فقط للجهد مقابـل عـدد لامتنـاهي مـن المستويات في الإشارات التشابهية وبسهولة تصميم وتصنيع الدوائر والأجهزة الرقمية وبسـهولة اسـتخدام نفس المعدات الرقمية وخاصة الحواسيب للتعامل مع مختلف أنواع إشارات المعلومات التي أصبحت تأخـذ نفس الشكل وهو سلسلة الأصفار والآحاد مما أدى إلى اندماج تقنية الاتصالات وتقنية الحواسيب فـي تقنيـة واحدة. وتتميز كذلك بقابليتها الكبيرة للضغط بسبب سهولة التخلص من المعلومات المكررة فيها مما قلل كثيرا من الحيز الذي تحتله هذه المعلومات على قنوات الاتصال وذاكرات الحواسيب وبسهولة تشفيرها وتمويههـا مما قلل كثيرا من أخطار التنصت والسطو على المعلومات بمختلف أنواعها.

معالجة الإشارات الرقمية (Digital Signal Processing)

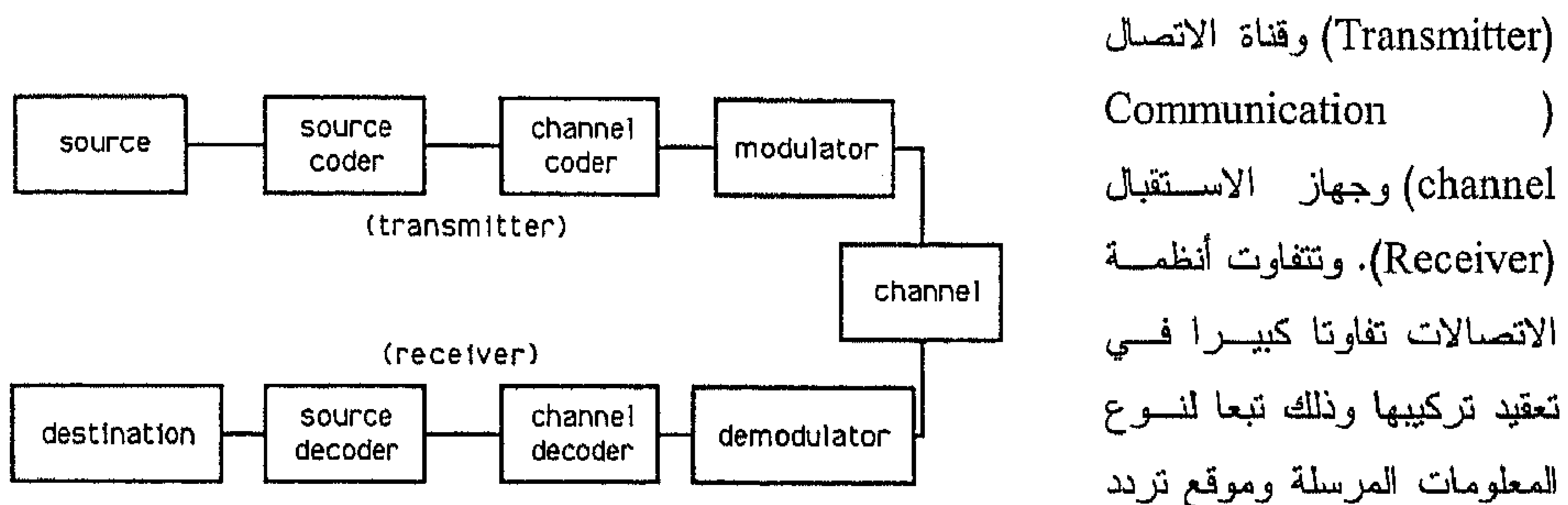
إن من أهم حسنات التقنية الرقمية هو إمكانية معالجة مختلف أنواع الإشارات بطريقة رقمية حيـث أن معظم الإشارات التي تتعامل معها أنظمة الاتصالات وغيرها من الأنظمـة هـي مـن النـوع التشـابهي (analog) والتي يصعب معالجتها إلا بطرق بسيطة كتمريرها على المرشحات للتخلص من بعض الضـجيج الذي فيها أو لتحديد عرض نطاقها. أما الإشارات الرقمية فيمكن إجراء عمليات لا حصر لهـا مـن أنـواع المعالجة عليها هذا إلى جانب أن بعض وظائف المعالجة كالترشيح مثلا تـتم بشـكل أكبـر دقـة حيـث أن المرشحات الرقمية (digital filters) يمكن تصميمها بحيث تكون خصائصها أقرب ما يكـون لخصـائص المرشحات المثالية التي يستحيل بناؤها بالطريقة التشابهية. هذا بالإضافة إلى أن المرشحات العادية يتم بناؤها من المقاومات والمواسعات والمحاثات والتي تحتل حيزا كبيرا في الأجهزة المستخدمة فيهـا بينمـا نجـد أن المرشحات الرقمية لا تحتاج إلى مثل هذه المكونات بل تتم عملية المعالجـة باسـتخدام المعالجـات الدقيقـة (microprocessors) الصغيرة الحجم ولولا هذا لما كان بالإمكان تصنيع هواتف خلوية بمثل هـذا الحجـم الصغير. ومن ميزات المرشحات الرقمية أنه يمكن تغيير خصائصها بكل سهولة وخلال زمن بالغ القصر من خلال التحكم ببرامجها وبهذا فإنه يمكن تصميم مرشحات متكيفة (adaptive filters) مع طبيعة الإشارات المارة عليها والتي قد تتغير مع الزمن كما هو الحال مع إشارات الهواتف الخلوية.

إن المعالجة الرقمية لا تقتصر على عمليات الترشيح فقط بل تتعداها إلى وظائف بالغة التعقيد منهـا إمكانية ضغط الإشارات الرقمية بدرجات متفاوتة حسب نوع الإشارة وذلك لتحتل حيزا أصغر فـي ذاكـرات

التخزين أو عرض نطاق أقل في قنوات الاتصال ولو هذا لما كان بالإمكان تخزين الإشارات المرئية على الأقراص المدمجة أو في ذاكرات الهواتف الخلوية ولما كان بالإمكان بث مئات المحطات التلفزيونية من قمر صناعي واحد. وباستخدام المعالجة الرقمية يمكن استخلاص معلومات بالغة الأهمية من الصور فيما يسمى بمعالجة الصور (image processing) حيث تستخدم هذه التقنية في أجهزة التصوير الطبية المختلفة كأشعة إكس والرنين المغناطيسي والتصوير المقطعي والفوق صوتي لتشخيص ومعالجة الأمراض بمختلف أنواعها ومراقبة الأجنة وتستخدم كذلك في التنبؤات الجوية لزيادة دقة التنبؤ وفي أنظمة الاستشعار عن بعد لاستغلال ثروات الأرض ومعرفة تضاريسها وفي الجيولوجيا للتنبؤ بالزلازل والبراكين وفي الروبوتات لأغراض الرؤيا وإلى غير ذلك من التطبيقات التي لا حصر لها. ومنذ اختراع المعالجات الدقيقة في بداية السبعينات بدأ المهندسون بالتفكير في تصميم معالجات خاصة لأغراض المعالجة الإشارات الرقمية والتي تتميز بسرعتها الكبيرة في إجراء الحسابات الرياضية والتي تتطلبها هذه المعالجة. ولقد قامت مختبرات بل الأمريكية في عام 1979م بتصنيع أول معالج للإشارات الرقمية بينما تمكنت شركة تجهيزات تيكساس في عام 1983م بتصنيع أول معالج رقمي (TMS32010) من سلسلة معالجاتها الشهيرة والتي لاقت رواجا كبيرا في كثير من التطبيقات. ويوجد الآن في الأسواق معالجات إشارات رقمية مصممة للتطبيقات العامة أو الخاصة وبقدرات وسرعات كبيرة جدا تستخدم في مختلف التطبيقات الآنفة الذكر.

3-5 مكونات نظام الاتصالات الكهربائي

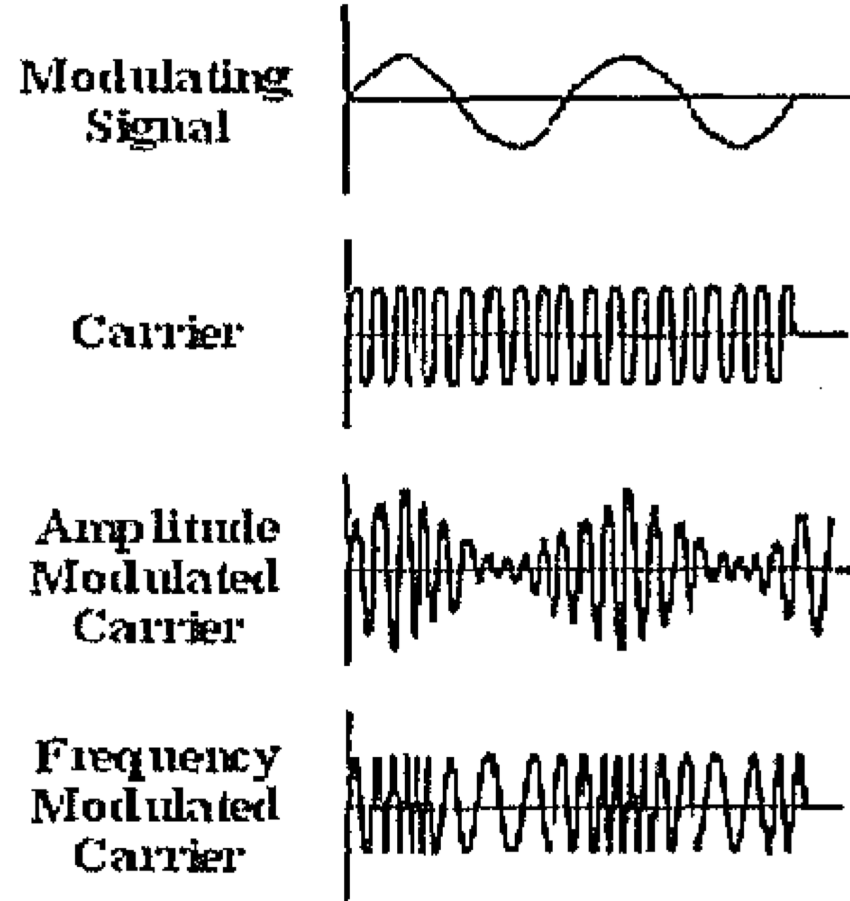
يتكون نظام الاتصالات الكهربائي بشكل عام من ثلاث وحدات أساسية وهي جهاز الإرسال (Transmitter) وقناة الاتصال (Communication channel) وجهاز الاستقبال (Receiver). وتتفاوت أنظمة الاتصالات تفاوتا كبيرا في تعقيد تركيبها وذلك تبعا لنوع المعلومات المرسلة وموقع تردد حامل المعلومات على الطيف الكهرومغناطيسي ونوع قناة الاتصال والمسافة بين المرسل والمستقبل ونوع تقنية الإرسال فيما إذا كانت تشابهية أو رقمية وغير ذلك.



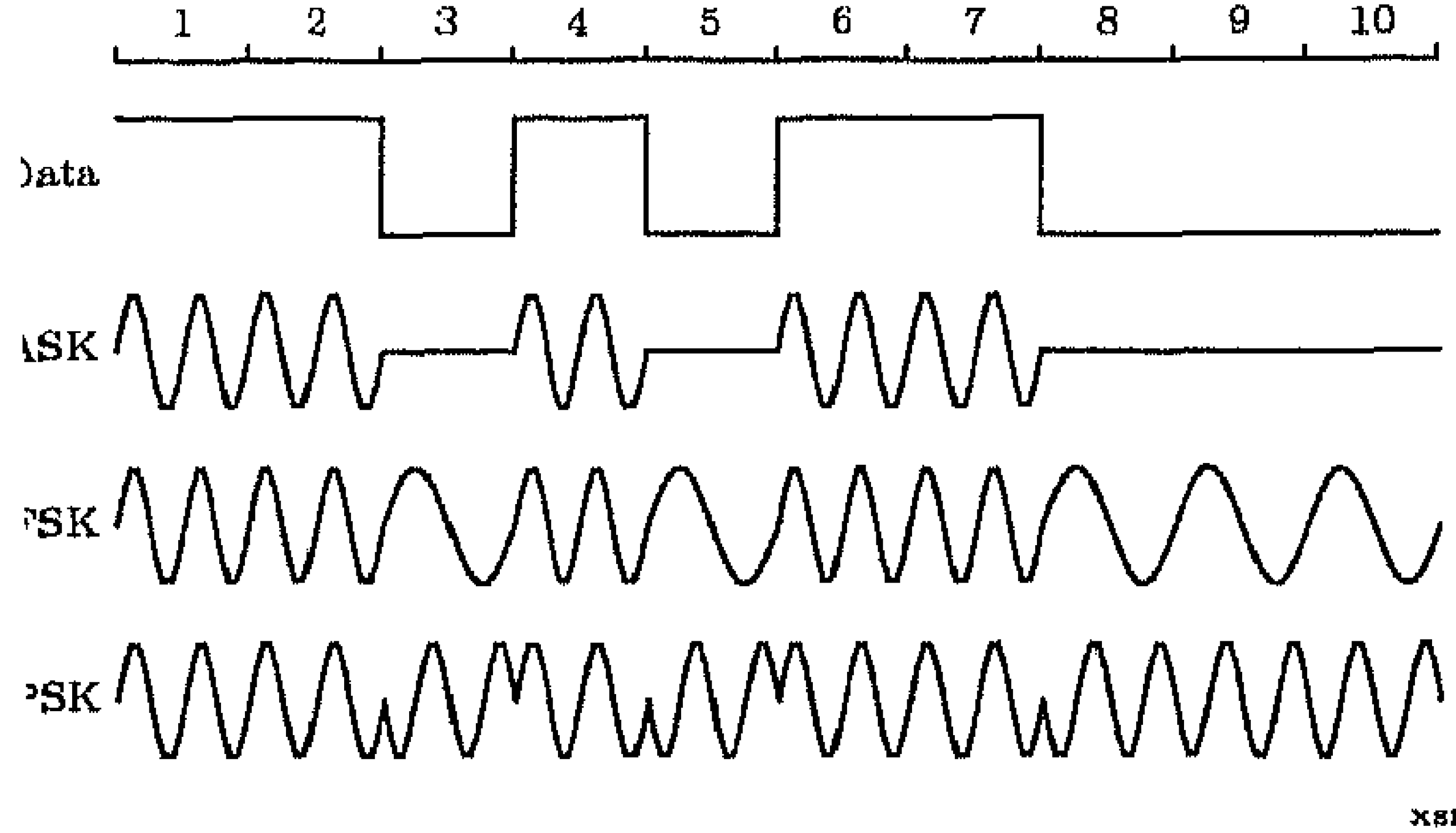
المرسلات والمستقبلات (Transmitter & Receiver)

يتكون المرسل في أبسط أشكاله من مصوغ دخل (input transducer) يقوم بتحويل إشارة المعلومات الأصلية إلى إشارة كهربائية تشابهية (analog signal) يتم إرسالها باستخدام الأسلاك إلى المستقبل بدون إجراء أي تعديل على شكلها. ويتكون المستقبل في مثل هذه الحالة من مصوغ خرج (output transducer) يقوم بتحويل الإشارة الكهربائية إلى إشارة المعلومات الأصلية وقد يلزم استخدام مضخم إلكتروني لتكبير الإشارة الضعيفة عند المستقبل. ويسمى مثل هذا النظام من الإرسال بنظام إرسال النطاق الأساسي (baseband transmission system) وأكثر ما يستخدم في إرسال المكالمة الهاتفية من هاتف

المنزل إلى المقسم. أما نظام الإرسال الأكثر شيوعا فهو نظـــام إرســـال النطـــاق التمريـــري (passband transmission system) حيث يتكون المرسل من مصوغ يغذي إشارته الكهربائية إلى جهـــاز إلكترونـــي يسمى المعـــدل أو المضـــمن (modulator) بينمـــا يتكـــون المستقبل من مضخم متبوع بكاشف التعديل (demodulator) ثم مصوغ الخرج.

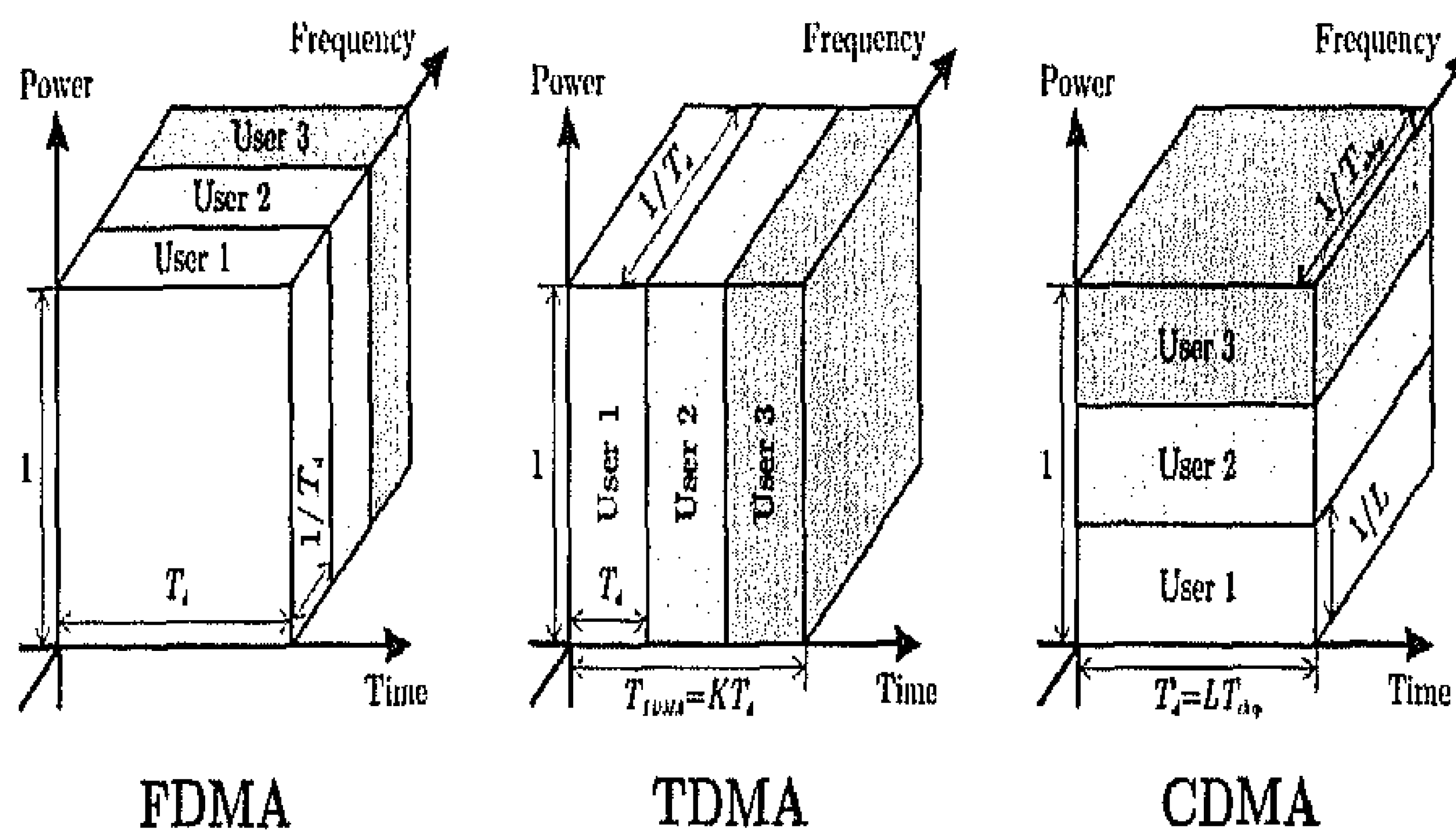


وتلزم عملية التعـــديل (modulation) لأغـــراض مختلفة منها مواءمة خصائص إشارة المعلومات الكهربائية مع خصائص قناة الاتصال وكذلك لاستغلال كامل نطاق القناة من خلال إرسال أكثر من إشارة معلومات عليها. وتـــتم عمليـــة التعديل من خلال تحميل إشارة المعلومات على حامل جيبـــي (sinusoidal carrier) يقع تردده ضمن نطاق تمرير القناة وذلك بتغيير قيمة اتساع (amplitude) أو تردد (frequency) أو طور (phase) الحامل تبعا للقيمة اللحظية لإشارة المعلومات بما يســـمى تعـــديل الاتســـاع ((Amplitude Modulation (AM)) أو تعـــديل التـــردد ((Frequency Modulation (FM)) أو تعديل الطور ((Phase Modulation (PM)). ولكل مـــن أنـــواع التعديل هذه ميزاتها وسيئاتها فتعديل الاتساع يحتل أقل حيز ممكن على قناة الاتصال ممـــا يزيـــد مـــن عـــدد الإشارات المرسلة عليها إلا أنـــه يتـــأثر كثيرا بالضجيج (noise) مما يستلزم رفع قدرة المرسل وفي المقابـــل فـــإن تعـــديل التردد أو الطـــور لهمـــا مقاومـــة عاليـــة للضجيج وهذا يخفض من قدرة الإشـــارة التي يبثها المرسل ولكـــن ضـــريبة هـــذا التخفيض هو الحيز الكبير الـــذي تحتلـــه الإشارة على قناة الاتصال مما يقلل مـــن عدد الإشارات المرســـلة عليهـــا. وفـــي مرسلات ومستقبلات أنظمة الاتصالات الرقمية يتم استخدام نفس أنواع التعديل المذكورة أعلاه ولكن اتســـاع وتردد وطور الحامل تأخذ قيم محددة ومعدودة وليست متصلة ولذلك سميت المعدلات بأســـماء تعكـــس هـــذه الحقيقة كتبديل الاتساع المزاح (Amplitude-Shift Keying ASK) وتبديل التردد المزاح (-Frequency Shift Keying FSK) وتبديل الطور المزاح (Phase-Shift Keying PSK).



ويوجد في المرسلات إلى جانب المعدل جهاز يسمى المعقب (multiplexer) حيـــث تلـــزم عمليـــة التعاقب (multiplexing) لاستغلال قناة الاتصال استغلالا كاملا بإرسال أكبر عدد ممكـــن مـــن إشـــارات المعلومات عليها من خلال استخدام طرق تعاقب مختلفة. ففـــي تعاقـــب التقســـيم التـــرددي (Frequency Division Multiplexing (FDM)) وتعاقـــب التقســـيم المـــوجي (Wave Division Multiplexing (WDM)) يتم تقسيم نطاق القناة إلى عدد من النطق الصغيرة تتسع كل منها لإشارة معلومات واحدة. أما في تعاقب التقسيم الزمني ((Time Division Multiplexing (TDM)) فيتم الاستفادة من الفراغات الزمنية بين عينات الإشارة الواحدة لإرسال عينات إشارات أخرى وفي تعاقب التقســـيم التشـــفيري (Code Division

(Multiplexing (CDM يتم تعديل الإشارات المختلفة بشيفرات مميزة ومتعامدة بحيث يمكن الفصل بينها بسهولة عند المستقبل. ويوجد في المرسلات الرقمية وحدات إضافية إلى جانب المعدلات والمعقبات تقوم بوظائف بالغة الأهمية لا يمكن لها أن تنجز في أنظمة الاتصالات التشابهية ولذلك أصبحت الأنظمة الرقمية هي الخيار الأفضل. ومن هذه الوحدات ما يسمى بمشفرات المصدر (source encoders) والتي تستخدم لضغط المعلومات (data compression) من خلال التخلص من المعلومات المكررة التي يصدرها مصدر المعلومات فيقل بذلك الحيز التي تحتله الإشارة المرسلة على قناة الاتصال. ويوجد أيضا ما يسمى بمشفرات القناة (channel encoders) والتي تستخدم لإضافة بعض البيانات مع المعلومات الأصلية تعمل على تقليل تأثير الضجيج على الإشارات المستلمة. ويوجد كذلك وحدات التعمية (encryption) أو المعميات والتي تقوم بإجراء عملية خلط وبعثرة للمعلومات الأصلية بطريقة مدروسة وذلك للحفاظ على سرية المعلومات المرسلة ومنع المتطفلين من التنصت عليها أو تغيير محتوياتها.



قنوات الاتصال السلكية واللاسلكية (Wire & Wireless Channels)

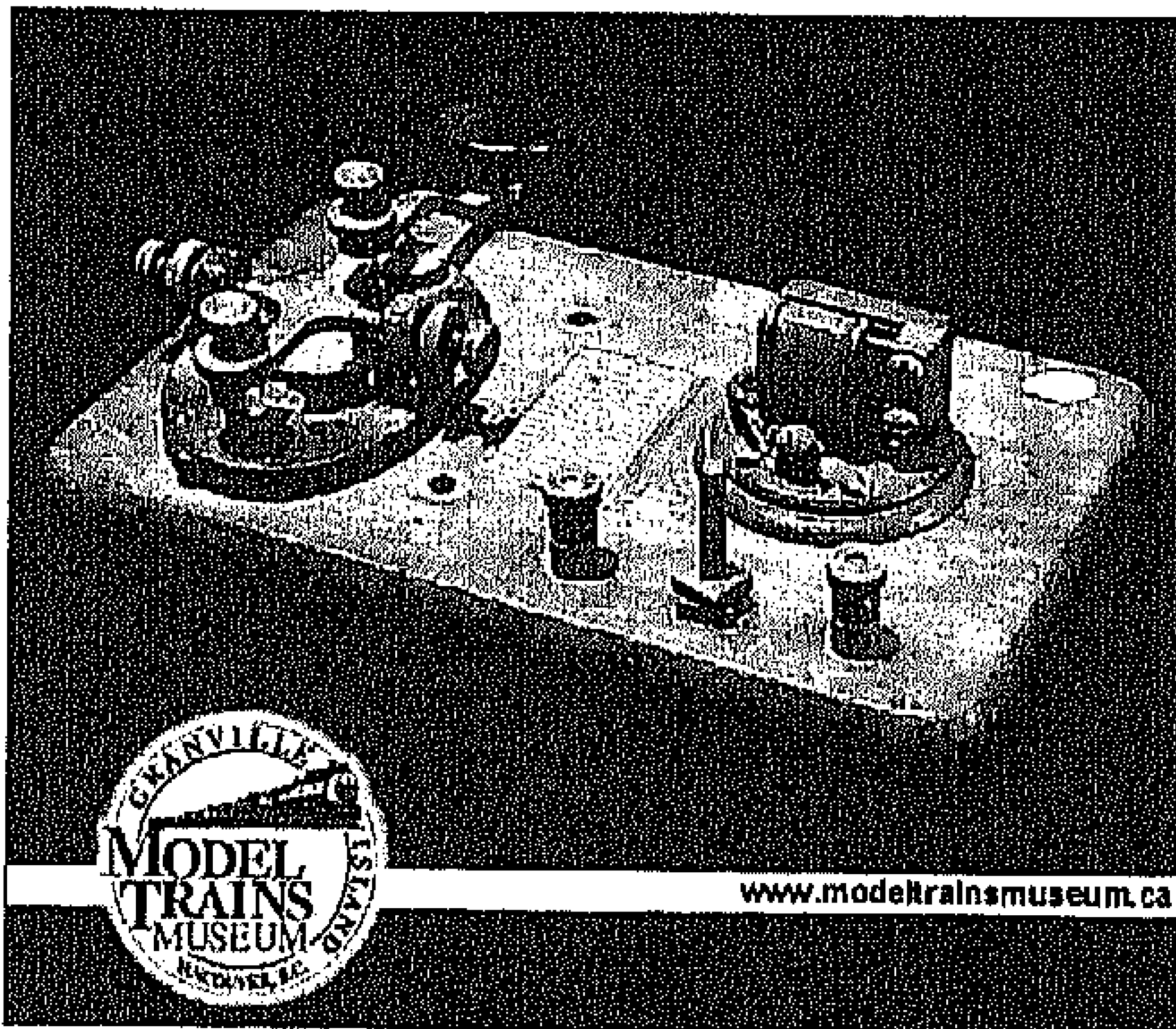
تستخدم قنوات الاتصال السلكية واللاسلكية لنقل الإشارة الكهربائية الحاملة للمعلومات من المرسل إلى المستقبل وغالبا ما تتحدد إمكانيات نظام الاتصالات المستخدم من خصائص هذه القناة فعرض نطاقها (channel bandwidth) يحدد كمية المعلومات المنقولة من خلالها وفقدها (channel loss) يحدد مسافة الإرسال القصوى وطولها يحدد مقدار التأخير الزمني (time delay). ففي القنوات السلكية تنتشر الإشارات من خلال أسلاك معدنية أو زجاجية كالمزدوجات السلكية والكبلات المحورية ومرشدات الموجات والألياف الزجاجية والتي شرحنا تركيبها وخصائصها في باب الموجات الكهرومغناطيسية والهوائيات وخطوط النقل. وفي القنوات اللاسلكية يتم استخدام الهوائيات (antennas) لربط المرسل مع المستقبل بدون وجود أسلاك بينهما وذلك من خلال الفضاء حيث يقوم هوائي الإرسال بتحويل الإشارات الكهربائية الخارجة من المرسل إلى موجات كهرومغناطيسية تنتشر في الفضاء فيقوم هوائي الاستقبال بالتقاط هذه الموجات وتحويلها إلى إشارات كهربائية يغذى بها المستقبل. وتنتشر الموجات الكهرومغناطيسية في الأصل على شكل خطوط مستقيمة إلا أنها بسبب قربها من الأرض وضمن الغلاف الجوي قد تتعرض لكثير من الظواهر الفيزيائية كالانعكاس والانكسار والحيود والاضمحلال والتبعثر التي قد تضر ببعض أنظمة الاتصالات وتفيد البعض الآخر. وقد تم تقسيم الموجات الراديوية تبعا لطريقة انتشارها إلى ثلاثة أنواع وهي الموجات السطحية والتي تنتشر ملاصقة لسطح الأرض فتنحني بانحنائه بسبب ظاهرة الحيود والموجات السماوية التي تنعكس عن طبقات الجو المسماة بالأيونسفير الذي يعكس الموجات التي تقل تردداتها عن 30 ميغاهيرتز والموجات الفضائية التي تنتشر على شكل خطوط مستقيمة وتشمل الموجات التي تزيد تردداتها عن 30 ميغاهيرتز ويلزم لاستخدامها توفر شرط الرؤيا المباشرة بين هوائيي الإرسال والاستقبال. إن أهم ما

يميز القنوات اللاسلكية هو حرية حركة المرسل والمستقبل وسهولة بناء أنظمة الاتصالات اللاسلكية بسبب غياب مد الأسلاك وكذلك إمكانية إرسال المعلومات لأعداد ضخمة من المستقبلين كما في أنظمة البث الراديوي والتلفزيوني. أما عيبها فهو أن الفضاء قناة مشتركة لجميع أنظمة الاتصالات اللاسلكية ولذلك فإن كمية المعلومات التي يمكن أن يرسلها المستخدم مقيدة بعرض النطاق المخصص له في الطيف الكهرومغناطيسي.

يتكون الطيف الكهرومغناطيسي من ثلاثة أجزاء رئيسة وهي الطيف الراديوي الذي يمتد من الصفر إلى 300 جيقاهيرتز وطيف الأشعة المرئية وتحت الحمراء والذي يمتد من 300 جيقاهيرتز إلى ثلاثة ملايين جيقاهيرتز وطيف الأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية والكونية والتي يتعذر استخدامها في أنظمة الاتصالات لصعوبة توليدها ولخطورتها على الكائنات الحية. ونظرا للتباين الكبير في طرق توليد وإشعاع وانتشار موجات الطيف الراديوي فقد تم تقسيمها إلى عدة مناطق وهي الترددات تحت المنخفضة (300 إلى 3000 هيرتز) والترددات المنخفضة جدا (3 إلى 30 كيلوهيرتز) والترددات المنخفضة (30 إلى 300 كيلوهيرتز) والترددات المتوسطة (300 إلى 3000 كيلوهيرتز) والترددات العالية (3 إلى 30 ميغاهيرتز) والترددات العالية جدا (30 إلى 300 ميغاهيرتز) والترددات فوق العالية (300 إلى 3000 ميغاهيرتز) والترددات فائقة العلو (3 إلى 30 جيقاهيرتز) والترددات بالغة العلو(30 إلى 300 جيقاهيرتز). يتم تخصيص الترددات للمستخدمين من قبل هيئات تنظيم قطاع الاتصالات الوطنية بالتعاون مع الاتحاد الدولي للاتصالات (International Telecommunication Union) الذي يحدد الترددات المتاحة لأنظمة الاتصالات المختلفة والذي عادة ما يسمح بإعادة استخدام نفس التردد شريطة عدم وجود تداخل بين الأنظمة المختلفة بالاستفادة من التباعد الجغرافي وقدرة البث المحدودة واستخدام طرق تعديل وتشفير واستقطاب مختلفة.

4-5 التلغراف والتلكس والفاكس

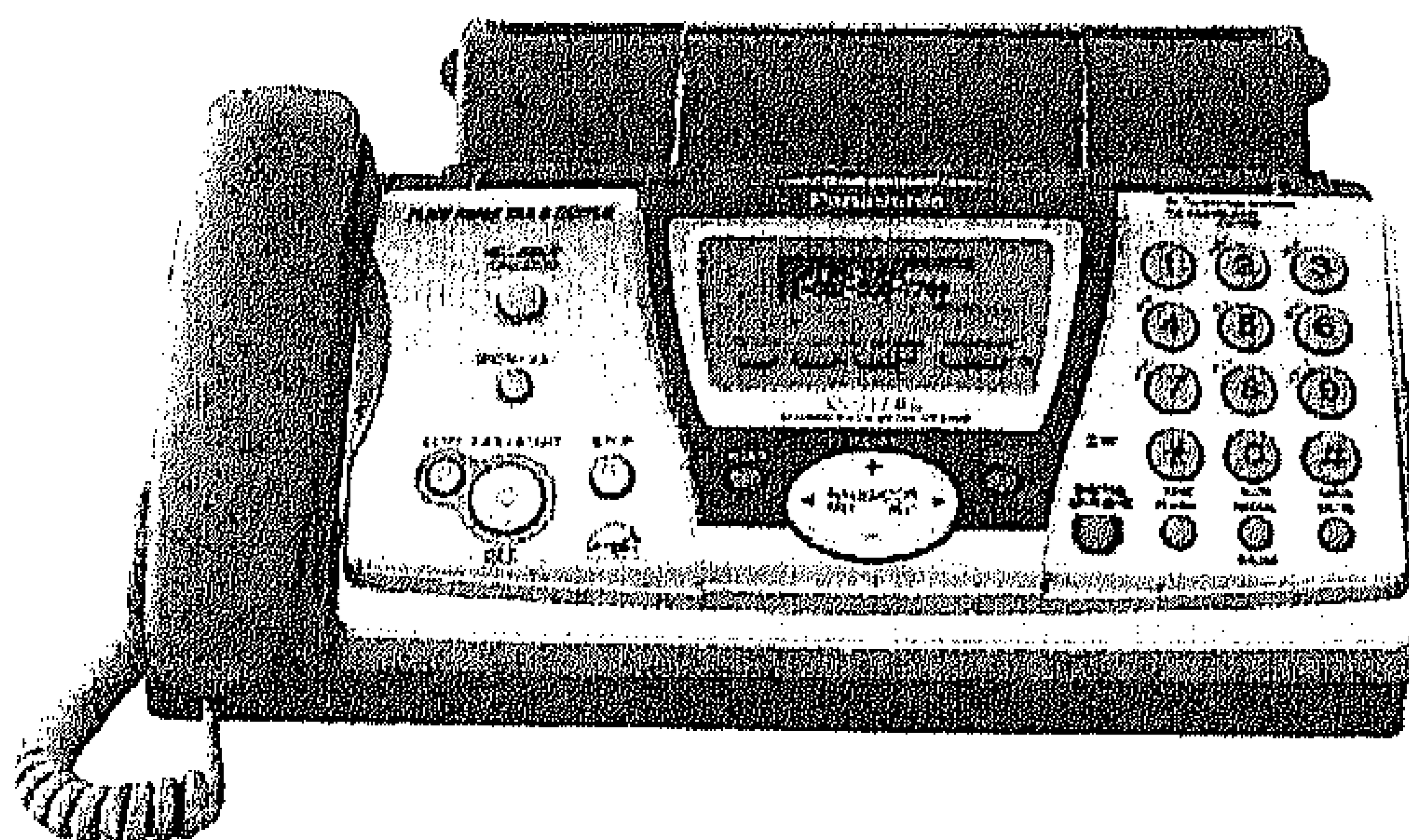
لقد كان التلغراف أول تطبيق ذا أهمية للكهرباء بعد اختراعها في عام 1800م وأول نظام اتصالات كهربائي أحدث تحولا جذريا في طريقة نقل المعلومات بين البشر. لقد تمكن الأمريكي صموئيل مورس (Samuel Morse) بالتزامن مع كل من الإنكليزيين وليم كوك (William Cooke) وتشارلز ويتستون (Charles Wheatstone) من اختراع نظام التلغراف في عام 1837م. ويقوم التلغراف والذي يعني "الكتابة عن بعد" بتحويل الرسالة المكتوبة إلى سلسلة من النبضات الكهربائية الطويلة والقصيرة باستخدام شيفرات محددة تمكن مورس من وضعها لتمثيل الحروف الأبجدية. وقد كانت شيفرات مورس متغيرة الطول (variable-length code) حيث أعطى شيفرات قصيرة للأحرف الأكثر تكرارا وشيفرات طويلة للأحرف الأقل تكرارا وذلك لتقليل طول فترة إرسال الرسالة. ويتم إرسال هذه الشيفرات من خلال الضغط



على مفتاح كهربائي يقوم بإغلاق وفتح دائرة كهربائية تمتد بين المرسل والمستقبل وعند المستقبل يتم التقاط هذه الشيفرات بطرق مختلفة كانت في البداية عبارة عن بوصلة تنحرف عند مرور التيار في ملف كهربائي ثم استبدلت بقلم مثبت على مطرقة كهربائية يقوم برسم الشيفرات على شكل خطوط طويلة وقصيرة يقوم عامل التلغراف بترجمتها وتحويلها للرسالة الأصلية.

بدأت خدمة التلغراف بالانتشار بشكل متسارع في جميع أنحاء أمريكا الشمالية وأوروبا وبقية دول العالم وتم ربط المراكز البريدية ومحطات القطارات والمراكز المالية والدوائر الحكومية والوحدات العسكرية بشبكة من أنظمة التلغراف فسهلت بذلك على الناس نقل الرسائل والأخبار بسرعة الضوء. ولقد تم مد أول كبل بحري عبر القنال الإنكليزي لتوفير خدمة التلغراف بين فرنسا وإنكلترا في عام 1851م وتم تشغيل أول نظام تلغراف بحري بين أوروبا وأميركا في عام 1866م. وفي عام 1874م تمكن الأمريكي أديسون من إرسال أربع برقيات (اثنتان في كل اتجاه) على نفس الخط وتم زيادتها إلى 8 برقيات في عام 1915م. وفي عام 1896م بدأت المحاولات لاستخدام الموجات الكهرومغناطيسية لنقل الرسائل البرقية لاسلكيا ولكن بسبب ضعف الإشارات وعجزها عن تشغيل أجهزة استقبال التلغراف تأخر استخدامها عمليا إلى أن تم اختراع الصمام الإلكتروني في عام 1906م. ومع اختراع نظام الطباعة عن بعد (teleprinter) في عام 1901م أصبح بالإمكان إرسال الرسائل المكتوبة بشكل أسهل وأسرع فما يطبع على طابعة الإرسال يظهر مباشرة على الورق عند طابعة الاستقبال وبذلك بدأت خدمة الطابعات البعدية تحل تدريجيا محل نظام التلغراف البسيط. وفي الطابعات البعدية تم استخدام شيفرات ثابتة الطول (fixed length code) بطول يبلغ خمسة أحرف تم وضعه من قبل العالم الفرنسي إميل بودت (Emile Baudot) في عام 1874م. وفي عام 1931م تم استخدام مقاسم خاصة لربط الطابعات عن بعد على غرار مقاسم الهاتف وإعطاء رقم لكل مشترك فظهر ما يعرف بنظام التلكس (telex) والذي بدأ بالانتشار السريع مع تزايد الطلب على الاشتراك بها من قبل الشركات والمؤسسات والبنوك وغيرها.

أما نظام الفاكس أو النسخ عن بعد فيتميز على التلغراف والتلكس بقدرته على إرسال صورة طبق الأصل عن الوثيقة الأصلية التي قد تتكون من الصور والخرائط والرسومات أو النصوص المطبوعة أو المكتوبة بخط اليد. لقد تم تسجيل أول براءة اختراع لجهاز الفاكس في عام 1843م باسم المخترع السكوتلندي الكسندر بين (Alexander Bain) وقد تم بناء أول فاكس عملي من قبل الايطالي جيوفاني كاسيلي (Giovanni Caselli) في عام 1861م وكانت هذه الفاكسات كبيرة الحجم تستخدم البندولات لعملية مسح الصورة والطرق الكيميائية لإظهار الصور ولذا كانت محدودة الاستخدام. وفي عام 1929م قام المهندس الألماني ردولف هيل (Rudolf Hell) بتصنيع أول أشكال الفاكسات الحديثة حيث تم استخدام المسح الميكانيكي والكواشف الضوئية لتحويل محتويات الصفحة المراد إرسالها إلى إشارة كهربائية ترسل من



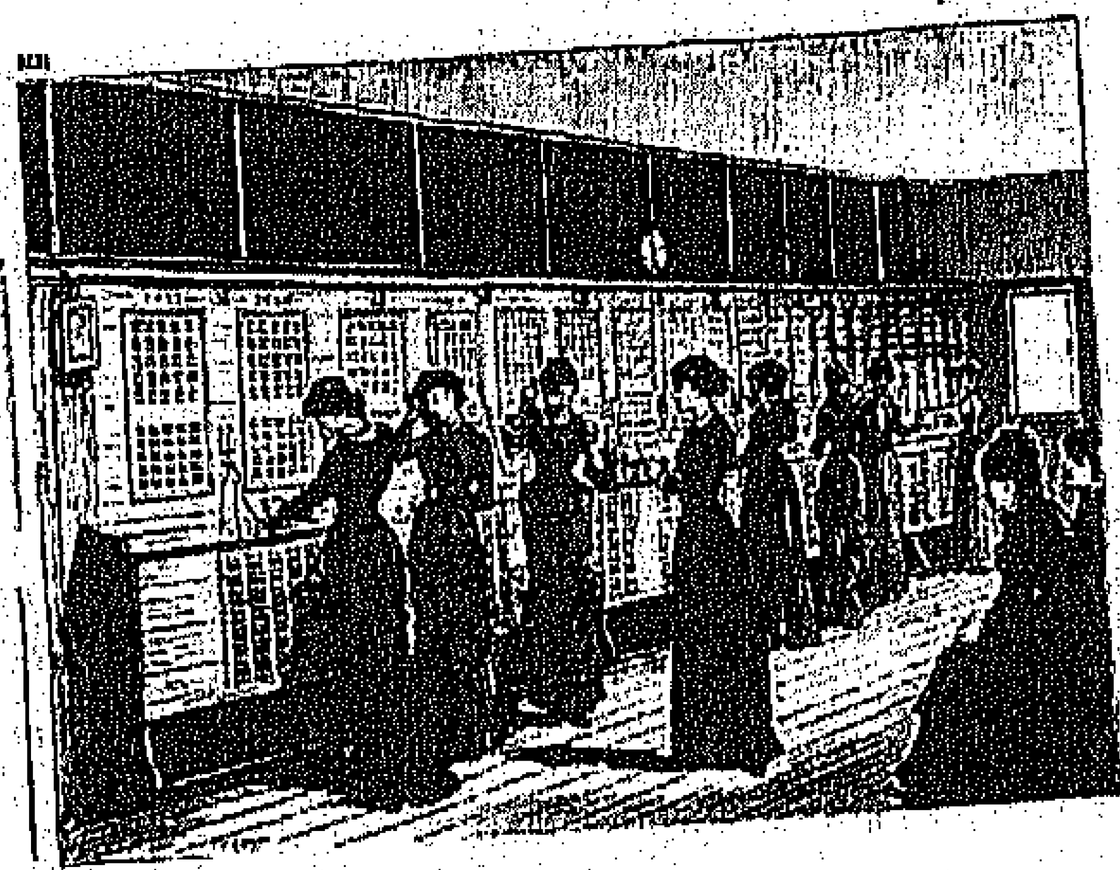
خلال شبكات الهواتف العامة فيقوم جهاز آخر بإعادة طبعها على فيلم يتم تحميضه لإظهار الصورة. وفي السبعينات من القرن العشرين ظهرت أنظمة الفاكس التي تستخدم طرق المسح الإلكترونية والطباعة على الورق الحراري فقلصت كثيرا من زمن الإرسال بحيث يمكن إرسال واستقبال الصفحة في عدة دقائق. ومع استخدام التقنية الرقمية في الإرسال وتقنية ضغط البيانات وطابعات الحبر المنفوث في التسعينات أصبح زمن إرسال الصفحة يتم في أقل من عشرة ثواني مع إمكانية إرسال الوثائق الملونة.

5-5 شبكات الهاتف (Telephone Networks)

بدأت المحاولات لنقل الصوت باستخدام الكهرباء منذ اختراع التلغراف في عام 1837م وقد تم تسجيل عدد كبير من براءات الاختراع لنظام الهاتف في كل من أميركا وأوروبا ولكن لم يفلح أحد في تصنيع جهاز هاتف عملي. وفي عام 1876م تمكن الأمريكي جراهام بل (Alexander Graham Bell) من تصنيع أول جهاز هاتف عملي كان يتكون من ميكرفون يحول الصوت إلى إشارة كهربائية وسماعة تحول الإشارة الكهربائية إلى صوت. وقد أسس جراهام بل في عام 1877م أول شركة للخدمة الهاتفية (شركة بل للهواتف) التي قامت ببناء أول شبكة هاتفية في إحدى المدن الأمريكية بسعة 21 خط وكانت عملية ربط المشتركين تتم يدويا من قبل مأمور المقسم. وبعد هذا النجاح بدأ الطلب يتزايد على هذه الخدمة فتم بناء شبكات هاتفية محلية مماثلة في بقية المدن الأمريكية بحيث وصل عدد المشتركين بعد ثلاث سنوات إلى خمسين ألف مشترك. يعمل جهاز الهاتف كما في التلغراف باستخدام التيار المباشر أي على البطاريات حيث يوجد في المقسم عدد من البطاريات المشتركة لها جهد عالي نسبيا يبلغ 48 فولت في الأنظمة الحالية وتغذي هذه البطاريات على التوازي جميع هواتف المشتركين. وعندما يكون الهاتف في وضع عدم التشغيل فإن الدائرة الكهربائية تكون مفتوحة ولا تسحب أي تيار من البطارية أما عند رفع سماعة الهاتف لإجراء مكالمة فإنه يتم تلقائيا إغلاق الدائرة الكهربائية ويسري فيها تيار كهربائي يشغل لمبة صغيرة تنبه أحد عمال أو عاملات المقسم فيقوم بربط هاتفه بالهاتف الطالب فيبلغه الشخص شفويا برقم الهاتف المطلوب فيقوم بربط الهاتفين معا لتبدأ المكالمة بينهما.



وفي عام 1891م تمكن الأمريكي ألمون ستروجر (Almon Strowger) من اختراع المقسم الآلي الكهروميكانيكي المسمى بمقسم الخطوة-خطوة (step-by-step exchange) وتم استخدامه في عام 1892م في الشبكة الهاتفية كبديل عن مأمور المقسم في بعض المقاسم. وفي هذا المقسم كان يتم طلب رقم الهاتف من خلال أربعة مفاتيح تربط بالمقسم بأربعة أسلاك بالإضافة لسلك خامس لنقل المكالمة واستخدمت الأرض كخط راجع لهذه الأسلاك الخمسة. وقد تم في عام 1896م استبدال الهواتف ذات المفاتيح بالهواتف



القرصية ذات العشرة أرقام والتي ترتبط بالمقسم بسلكيين فقط بعد الاستغناء عن الأرض كخط راجع. وعند طلب الرقم باستخدام الهواتف القرصية فإن كل رقم يتم تدويره يولد نبضات كهربائية عددها يساوي عدد الرقم المدار وتقوم هذه النبضات بإغلاق مفاتيح متسلسلة تنتهي بربط الهاتف الطالب بالهاتف المطلوب. وفي عام 1915م تمكن المهندسون من زيادة مدى المكالمات الهاتفية لتصل إلى آلاف الكيلومترات باستخدام مضخمات الصمامات الإلكترونية التي تم اختراعها في عام 1906م. وفي عام 1935م تم استخدام الكبلات المحورية لنقل المكالمات الهاتفية بين المقاسم البعيدة وتم نقل عدد كبير من المكالمات على نفس الكبل باستخدام تقنية تعاقب التقسيم الترددي. وفي عام 1938م تم استخدام مقاسم القضبان المتعامدة (cross-bar exchange) والمرحلات الكهربائية التي تمتاز بصغر حجمها وقلة ضجيجها مقارنة بمقاسم الخطوة-خطوة. وفي عام 1946م تم استخدام أنظمة اتصالات الموجات الدقيقة لنقل المكالمات بين المدن وخاصة في المناطق الوعرة التي يتعذر فيها مد الكبلات المحورية.

وفي عام 1955م بدأت الخدمة الهاتفية السلكية بين أوروبا وأميركا بعد مد أول كيبل محوري بحري بينهما عبر المحيط الأطلسي وذلك بعد مرور ثمانين عاما على اختراع التلفون وذلك بسبب مشاكل فنية لم يتمكن المهندسون من حلها طول هذه المدة. مع التذكير بأن أول كيبل بحري لخدمة التلغراف قد تم مده في عام 1866م أي بعد مرور ثلاثين عاما فقط على اختراع نظام التلغراف وذلك بسبب أن التلغراف يتعامل مع نبضات كهربائية يمكن إرسالها لمسافات طويلة دون أن يؤثر عليها الضجيج كما هو الحال مع الأنظمة الرقمية الحديثة. وفي عام 1960م ظهر الجيل الأول من المقاسم الإلكترونية المبنية من الترانزستورات وتم استخدام التقنية الرقمية في نقل المكالمات بين المقاسم في عام 1962م. وفي عام 1964م ظهرت الهواتف ذات أزرار الكبس والتي يتم فيها إرسال رقم الهاتف المطلوب إلى المقسم باستخدام نبضة واحدة فقط لكل خانة من الرقم ولا يتجاوز طول النبضة عشر الثانية. وتتكون النبضة من إشارة جيبية بترددين مختلفين ولتمثيل الأرقام العشرة يلزم استخدام ثمانية ترددات تم اختيارهما في نطاقين منفصلين ضمن نطاق الترددات الصوتية أربعة ترددات في كل نطاق ويمثل كل رقم عشري بترددين واحد من كل نطاق ولذلك فإن هذه الطريقة في طلب الرقم تسمى الطلب متعدد التردد ثنائي النغمة (Dual Tone Multi Frequency (DTMF) Dialing) . وبعد استخدام الهواتف ذات الأزرار أصبحت عملية طلب الرقم مهما بلغ طوله تتم في ثواني معدودة بعد أن كانت تستغرق ما يقرب من الدقيقة في الهواتف القرصية. وفي عام 1965م تم استخدام الأقمار الصناعية في نقل المكالمات الهاتفية بين القارات وأصبحت بديلا ورديفا للكيبلات البحرية في نقل المكالمات الدولية. و في عام 1966م تم استخدام المقاسم المحكومة بالبرامج المخزنة بالحاسوب مما أدى إلى نقلة نوعية كبيرة في أنظمة توجيه المكالمات وترقيم الهواتف وإصدار الفواتير وتقديم كثير من الخدمات للمستخدمين. وفي عام 1967م ظهر الهاتف اللاسلكي والذي يتكون من جهاز القاعدة المرتبط بسلكي الهاتف الثابت وجهاز الهاتف المتحرك الذي يتراسل مع القاعدة بنظام اتصالات لاسلكي قصير المدى لا يتجاوز عشرات الأمتار مما أعطى بعض الحرية للمستخدمين للتجول في داخل وأفنية منازلهم وهم يجرون مكالماتهم. و في عام 1976م تم استخدام الدوائر الإلكترونية الرقمية كمبدلات بدلا من المرحلات المزمارية في المقاسم الإلكترونية مما



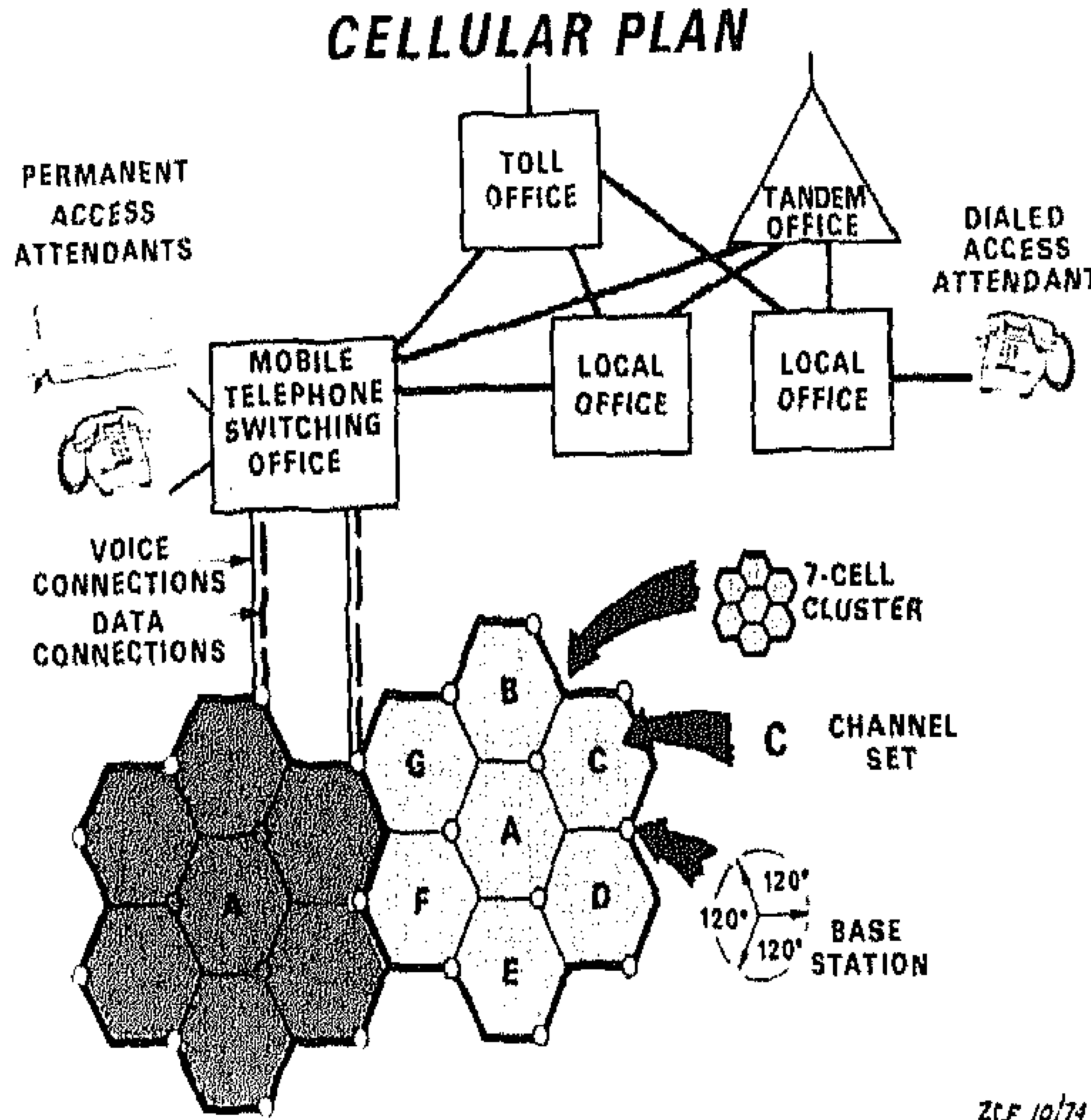
وفر حرية كبيرة في إعادة برمجة المقاسم لتلبي احتياجات المستخدمين المختلفة إلى جانب تقليص أحجام المقاسم. وفي عام 1977م تم استخدام الألياف الزجاجية لنقل المكالمات الهاتفية بين المقاسم ومن ثم استخدامها في الكبلات البحرية في عام 1988م. وفي عام 1983م ظهرت الهواتف الخلوية المحمولة في المركبات تبعها تلك المحمولة من قبل الأشخاص في بداية التسعينات. وفي عام 1994م تم استخدام الشبكة الهاتفية العامة لنقل خدمة الإنترنت للمنازل.

تربط شبكة الهواتف العامة اليوم ما يزيد عن ألف وخمسمائة مليون مشترك موزعين على جميع أنحاء الكرة الأرضية بحيث يمكنهم الاتصال ببعضهم من خلال الكبس على أزرار هواتفهم فيأتي الرد في ثوان معدودة. ولربط هذا العدد الضخم من المشتركين بهذه الشبكة العملاقة بأقل قدر ممكن من الأجهزة والأسلاك فقد تم ربط المشتركين في المنطقة الجغرافية الواحدة بمقسم محلي (local exchange) موجود في مركز ثقل التجمع السكاني لتقليل كمية الأسلاك النحاسية المستخدمة ومن خلال هذه الشبكة المحلية يستطيع المشتركون الاتصال آليا ببعضهم حيث يتولى المقسم الآلي تحديد مسار المكالمة بعد استلامه الرقم المطلوب. ولتمكين هؤلاء المشتركين من الاتصال مع مشتركي المقاسم المحلية الأخرى في الدولة الواحدة يتم ربط المقاسم المحلية المتجاورة بمقاسم مركزية وربط المقاسم المركزية بمقاسم وطنية وغالبا ما تستخدم الكبلات المحورية وكبلات الألياف الضوئية ووصلات الموجات الدقيقة لربط المقاسم ببعضها. أما الاتصال بين مشتركي الدول المختلفة فيتم من خلال ربط المقاسم الوطنية بمقاسم دولية ترتبط مع بعضها بشكل مباشر في حالة وجود حركة هاتفية كبيرة بين الدولتين أو من خلال دول أخرى في حالة الحركة الهاتفية الخفيفة وذلك باستخدام الكوابل المحورية و كوابل الألياف الضوئية ووصلات الموجات الدقيقة والأقمار الصناعية. ونظرا لحاجة الوزارات والمؤسسات والشركات والبنوك والجامعات والمستشفيات والمصانع وغيرها من التجمعات لتوفير الخدمة الهاتفية للعاملين فيها لتمكينهم من الاتصال فيما بينهم لإنجاز مهماتهم بكفاءة عالية فقد وجد أنه من غير المجدي اقتصاديا توفير خط هاتف عام لكل موظف ولذا كان الحل الأمثل بناء شبكة اتصال هاتفية فرعية خاصة في داخل هذه المؤسسات. تتكون الشبكة الهاتفية الفرعية الخاصة من مقسم فرعي آلي بسعة كافية لتوفير الخدمة الهاتفية بين مستخدمي الهيئة المعنية ويتم ربط هذا المقسم الفرعي مع الشبكة الهاتفية العامة بعدد كاف من الخطوط يتحدد من حجم الحركة الهاتفية الداخلة والخارجة.

الهواتف الخلوية (Cellular Telephones)

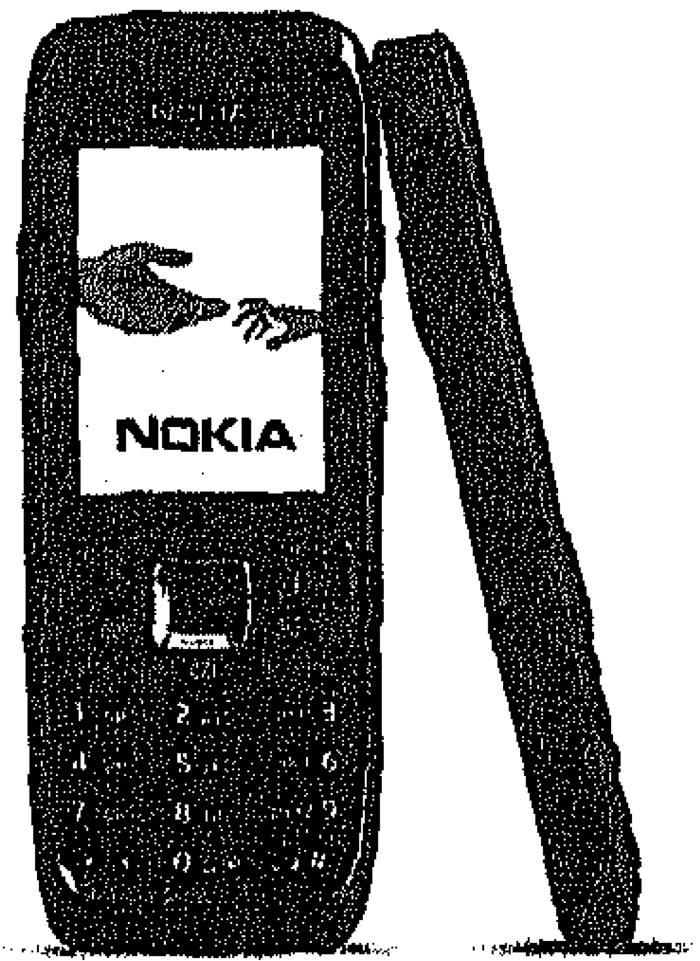
ظهرت فكرة أنظمة الاتصالات المتنقلة مع ظهور الإرسال اللاسلكي في بداية القرن العشرين ولكن بسبب الحجم الكبير لأجهزة الإرسال والاستقبال وحاجتها لطاقة عالية لتشغيلها فقد تأخر استخدامها إلى بداية الأربعينات حين استخدمت في أنظمة الملاحة الجوية والبحرية وفي الاتصالات العسكرية ولاحقا في أنظمة اتصالات الدفاع المدني والشرطة وسيارات الإسعاف وغيرها من التطبيقات التي تحمل فيها أجهزة الاتصال في المركبات. أما استخدامها في أنظمة الهواتف فقد تأخر إلى بداية الثمانينات بعد نضوج تقنيات الدوائر المتكاملة والمعالجات الدقيقة والبطاريات التي ساعدت على تصنيع هواتف صغيرة الحجم وخفيفة الوزن وقليلة الاستهلاك للطاقة يمكن حملها بالمركبات أو من قبل الأشخاص. ونظرا لقلة عدد الترددات المتاحة لشبكات الهواتف اللاسلكية فقد تم استخدام نظام الهواتف الخلوية (cellular telephone) والذي تتلخص فكرته في تقسيم المنطقة الجغرافية المراد تغطيتها إلى عدد من المناطق الصغيرة تسمى الخلايا (cells)

يتراوح قطر الخلية الواحدة بين نصف كيلومتر وعدة كيلومترات تبعا للكثافة السكانية حيث تصغر الخلايا مع زيادة الكثافة وتوضع في منتصف كل خلية محطة قاعدية (base station) تقوم بتأمين الاتصال لكل مشترك يدخل في حماها.



إن عدد الترددات المتاحة في النطاق المخصص للهواتف الخلوية (50 ميغاهيرتز) لا يتجاوز الألفي تردد ولتوفير قنوات اتصال لاسلكية لعدد كبير من المشتركين فلا بد من إعادة استخدام هذه الترددات لزيادة عدد المشتركين في هذا النظام ولكن بطريقة مدروسة تفاديا للتداخل بين المكالمات المنقولة على نفس التردد. وتتم عملية إعادة استخدام الترددات على النحو التالي: يتم توزيع جميع الترددات المتاحة على مجموعة خلايا متجاورة يطلق عليها اسم العنقود (cluster) وبترتيب معين شريطة أن لا يعاد استخدام التردد ضمن هذه المجموعة وبذلك نضمن عدم وجود أي تداخل بين المشتركين المتواجدين ضمن حدود هذه المجموعة ومن ثم يعاد استخدام نفس الترددات في خلايا عناقيد أخرى وبترتيبات جديدة تضمن عدم التداخل بين الخلايا المتجاورة في العناقيد المختلفة. ولضمان عدم التداخل بين مكالمات الخلايا التي تستخدم نفس التردد يتم تحديد قوة بث المحطات القاعدية في كل خلية بحيث تتضاءل قوة إشارتها دون مستوى معين خارج حدود الخلايا المحيطة بها. ويتكون نظام الهواتف الخلوية من محطات قاعدية وهواتف متنقلة ذكية تتخاطب فيما بينها باستمرار من خلال قنوات التأشير والتحكم لتأمين الترددات اللازمة لإجراء المكالمة ويتم ربط المحطات القاعدية مع مركز تبديل وتحكم خاص بشبكة الهواتف الخلوية لتأمين الاتصال بين جميع المشتركين ويتم ربط هذا المركز بمراكز تبديل شبكة الهواتف العامة لتأمين الاتصال مع مشتركي شبكة الهواتف العامة. إن أحد أهم متطلبات نظام الهواتف الخلوية هو توفر خدمة التسليم (handoff or handover) والذي يضمن عدم انقطاع مكالمة المستخدم الجارية عند انتقاله من خلية إلى خلية حيث يقوم النظام بتوفير تردد جديد من ترددات الخلية الجديدة ليحمل مكالمة المستخدم بمجرد دخوله في حماها.

لقد بدأ استخدام الهواتف الخلوية التشابهية في مطلع الثمانينات بهواتف كانت تحمل في المركبات



ومع تطور تقنية الدوائر المتكاملة والبطاريات تم صناعة هواتف خلوية صغيرة الحجم وخفيفة الوزن يمكن حملها من قبل الأشخاص وهذا هو الجيل الأول (1G) من أنظمة الهواتف الخلوية. وفي عام 1992م ظهر في أوروبا الجيل الثاني (2G) وهو النظام العالمي للاتصالات المتنقلة (GSM) والذي يستخدم التقنية الرقمية بدلا من التقنية التشابهية ويمتاز هذا الجيل بإمكانية زيادة عدد المشتركين باستخدام تقنيات متقدمة لضغط الصوت وكذلك إمكانية إرسال الرسائل القصيرة (SMS). وفي عام 2001م بدأت أول أشكال

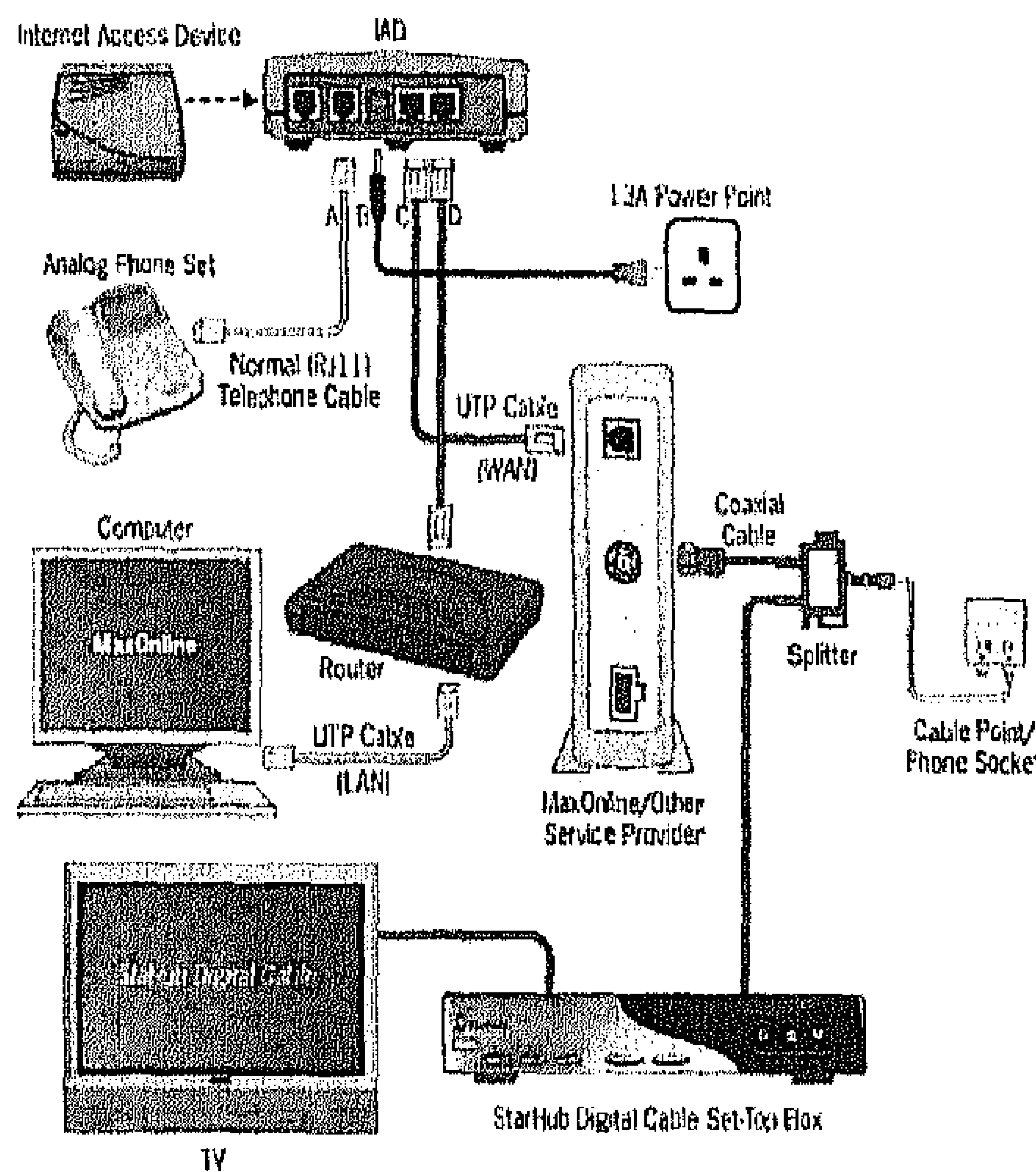
الجيل الثالث (3G) بالظهور ولكن ليس بكامل قدراته ولذلك أطلق عليه أسماء كالجيل الثاني والنصف (2.5G) والجيل الثاني وثلاثة أرباع (2.75G) والميزة الرئيسية للجيل الثالث على الثاني هو إمكانية نقل البيانات (data transmission) إلى جانب المكالمات الهاتفية وبمعدلات قد تصل لعدة ميجاهيرتز. إن إمكانية نقل البيانات في الجيل الثالث تمكن المستخدم من إرسال واستقبال البريد الإلكتروني وتصفح الإنترنت وتبادل الملفات ومعلومات الوسائط المتعددة (multimedia) كالصور الساكنة والملفات السمعية والمرئية بل وإجراء المكالمات بالصوت والصورة (video phone).

إن خدمة الهواتف الخلوية المتنقلة مقتصرة على مناطق محدودة على سطح الكرة الأرضية وذلك ضمن الخلايا التي يتم إنشاؤها من قبل شركات الاتصالات ولذا برزت في منتصف التسعينات فكرة تغطية معظم سطح الأرض بخدمة الهاتف المتنقل. ففي أميركا تم تطوير نظام الاتصالات الشخصي الذي يستخدم الأقمار الصناعية غير المتزامنة ذات المدارات المنخفضة والمتوسطة كمحطات قاعدية والتي يمكنها التقاط إشارات الهواتف الخلوية الضعيفة لقربها من الأرض غير أنها لا تظهر في سماء المنطقة إلا لفترة زمنية معينة نتيجة لعدم تزامن دورانها مع دوران الأرض كما في الأقمار المتزامنة ولهذا لا بد من وضع عدد كافي من هذه الأقمار في عدة مدارات توزع فيها أقمار المدار الواحد على محيطه بانتظام بحيث كلما غاب أحدها طلع القمر الذي يليه فتحول المكالمات تلقائيا إليه. لقد بدأت عدة شركات عالمية ببناء مثل هذه الأنظمة أشهرها نظام الإرديوم (Iridium) الذي أطلقته شركة "موتورولا" في عام 1998م والذي يتكون من 66 قمر موزعة على ستة مدارات دائرية فوق قطبية (11 قمر في كل مدار على ارتفاع 780 كيلومتر) ويشع كل قمر 48 شعاع يغطي كل شعاع خلية بمساحة أرضية يبلغ قطرها 150 كيلومتر ويستطيع القمر الواحد معالجة 1100 مكالمة هاتفية في آن واحد. ومن أنظمة هواتف الأقمار الصناعية المشهورة نظام الثريا والذي يستخدم قمرا صناعيا واحد فقط ولكنه موضوع في مدار متزامن على ارتفاع ستة وثلاثين ألف كيلومتر ويغطي أوروبا وأفريقيا والشرق الأوسط ومناطق كبيرة من أسيا. بلغ عدد الهواتف الخلوية في العالم عام 1988م 4 ملايين ارتفع إلى 11 مليون في عام 1990م وإلى 85 مليون في عام 1995م وإلى 600 مليون في عام 2000م وألفي مليون في عام 2005م وتجاوز العدد في عام 2007م ثلاثة آلاف مليون مشترك ومن المتوقع في عام 2010م أن يمتلك تسعين بالمائة من سكان العالم هواتف خلوية. لم يقتصر دور الهواتف الخلوية الحديثة التي لا يتجاوز وزن معظمها مائتي غرام على إجراء المكالمات الهاتفية بل تم تزويدها بوظائف لم تكن تخطر على البال ففيها كميرات عالية الدقة قادرة على التقاط صور ثابتة ومتحركة وفيها مسجلات رقمية يتم فيها تخزين كميات كبيرة من الملفات السمعية والمرئية وفيها راديو يلتقط بث المحطات الإذاعية الأرضية وفيها أنظمة تحديد الموقع ويعمل بعضها كحاسوب شخصي وإلى غير ذلك الخدمات.

الشبكة الرقمية متكاملة الخدمات (Integrated Services Digital Network)

لقد صممت شبكة الهواتف العامة لنقل المكالمات الهاتفية إلا أنه يمكن الاستفادة من إمكاناتها لنقل أنواع أخرى من المعلومات وبمعدلات تقع ضمن قدرات هذه الشبكة ولذا فقد تم استخدامها لربط أجهزة الفاكس والحواسيب. فلقد بدأ استخدام المودمات التشابهية (analog modems) في ربط الحواسيب من خلال الشبكة الهاتفية منذ الستينات وقد كان معدل النقل لا يتجاوز عدة مئات من البتات في الثانية ولكن مع

استخدام طرق تعديل متقدمة تم رفع معدل النقل إلى السعة القصوى لخط المشترك النحاسي والذي وصل اليوم إلى ما يقرب من 56 كيلوبت في الثانية. ومع تزايد الطلب على خدمة الإنترنت من خلال الشبكة الهاتفية أصبح من الضروري البحث عن حل لمشكلة تدني معدل نقل البيانات على خط المشترك النحاسي والذي يعود لعرض نطاقه الضيق الذي لا يتجاوز 3 كيلوهيرتز. ويمكن حل هذه المشكلة من حيث المبدأ باستخدام خطوط نقل ذات عرض نطاق واسع كالألياف الزجاجية والكبلات المحورية ولكن هذا الحل يتطلب صرف آلاف المليارات من الدولارات لاستبدال أكثر من ثلاثة آلاف مليون كيلومتر من الأسلاك النحاسية بما يماثلها من هذه الخطوط المقترحة. ولذا فقد انصب العمل على الإبقاء على خط المشترك النحاسي واستخدام التقنية الرقمية لزيادة معدل نقل البيانات عليه بعد التخلص من المرشحات الموجودة عند نهاية خط المشترك في المقسم المحلي والتي يعود السبب إليها في انخفاض عرض نطاق السلك النحاسي. وفي بداية التسعينات ظهر عدة أنواع من المودمات الرقمية التي أطلق عليها اسم خط المشترك الرقمي (Digital Subscriber Line (DSL)) تستطيع نقل البيانات بمعدلات أعلى بكثير من المودمات التشابهية بحيث وصل إلى ما يزيد عن 6 ميغابت في الثانية في بعض أنواعها والمسمى بخط المشترك الرقمي اللاامتماثل (Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL)). ونظرا لقدرة هذه الشبكة على نقل أنواع مختلفة من المعلومات فقد أطلق عليها اسم الشبكة الرقمية متكاملة الخدمات والتي تمتاز بإمكانية ربط ثمانية أجهزة مختلفة كالهواتف والحواسيب والفاكسات على نفس الخط ولكل جهاز رقمه الخاص بدلا من رقم واحد للخط في الشبكة الاعتيادية.



ولا زال حلم مهندسي الاتصالات بناء شبكة رقمية متكاملة الخدمات واسعة النطاق تستطيع نقل جميع أنواع المعلومات بما فيها الإشارات التلفزيونية وهذا يتطلب إجراء تعديلات جوهرية على معمارية وبرتوكولات الشبكة كاستبدال المقاسم الإلكترونية الهاتفية وخطوط النقل بين المقاسم بتقنيات ومعدات جديدة للتراسل والتبديل قادرة على التعامل مع مختلف أنواع المعلومات كتقنية نمط النقل اللامتزامن (**Asynchronous Transfer Mode (ATM)**) وتقنية التراتب الرقمي المتزامن ((Synchronous Digital Hierarchy (SDH)). تعمل تقنية نمط النقل اللامتزامن على نقل وتبديل البيانات الرقمية لمختلف أنواع إشارات المعلومات باستخدام التبديل الرزمي (packet switching) وتتميز هذه التقنية بثبات حجم الرزمة وذلك على خلاف رزم شبكات الحواسيب المتغيرة الحجم وهذا يساعد على تصميم معدات نقل وتوزيع ذات كفاءة عالية وذات تأخير زمني يمكن التحكم به بحيث يمكن نقل المكالمات الهاتفية والإشارات التلفزيونية من خلالها والاستغناء عن أنظمة التبديل الداراتي (circuit switching) ذات الكفاءة المتدنية. أما تقنية التراتب الرقمي المتزامن أو ما يسمى بالشبكة الضوئية المتزامنة ((Synchronous optical networking (SONET)) في النظام الأمريكي فهي تقنية تراسل ذات معدلات نقل عالية تبدأ بخمسين ميجابت في الثانية وتنتهي بمائة وستين جيقابت في الثانية

وتستخدم في ربط عقد الشبكات الرقمية وغالبا ما تستخدم كيبلات الألياف الضوئية كقنوات للاتصال نظرا لقدرتها الفائقة على نقل هذه المعدلات العالية من البيانات.

6-5 أنظمة التراسل السلكية (Wire Transmission Systems)

تستخدم أنظمة التراسل في نقل المعلومات بين العقد (nodes) المختلفة في شبكات المعلومات بمختلف أنواعها حيث يقوم نظام التراسل بربط عقدتين مع بعضهما ليمكنهما من تبادل المعلومات فيما بينهما. ويتحدد نوع نظام التراسل المستخدم من طول مسافة الإرسال ومن كمية المعلومات المراد تبادلها ومن طبيعة قناة الاتصال المتوفرة وكمية الضجيج المضاف. وتستخدم أنظمة التراسل مختلف قنوات الاتصال السلكية واللاسلكية تبعا لمواصفات الإرسال المطلوبة كالمزدوجات السلكية والكبلات المحورية والموجات الراديوية والضوئية والأقمار الصناعية والألياف الزجاجية.

أنظمة الكبلات المحورية (Coaxial Cables Systems)

تتميز الكبلات المحورية بعرض نطاق واسع بالمقارنة بالأسلاك المزدوجة فهو يمتد من الصفر وإلى ما يزيد عن ألف ميغاهيرتز وبمعامل فقد منخفض ولذا فقد تم استخدامها بعد اكتشافها في عام 1935م في نقل مختلف أنواع إشارات المعلومات ولعبت دورا كبيرا في نقل المكالمات الهاتفية بين المقاسم الوطنية والإقليمية والدولية قبل اكتشاف الموجات الدقيقة في منتصف الأربعينات وفي نقل المكالمات الهاتفية فيما بين القارات قبل ظهور أنظمة الأقمار الصناعية في منتصف الستينات. يعتبر مد الكبلات المحورية في المحيطات تحديا كبيرا للمهندسين نظرا للمسافات الكبيرة بين القارات والتي تصل إلى آلاف الكيلومترات إلى جانب إمكانية تعرض الكبلات للتلف من ضغط الماء الهائل في قاع المحيطات وحاجتها للطاقة الكهربائية اللازمة لتشغيل المعيدات التي توضع بعد كل عشرة كيلومترات على طول الكبل والتي لا يمكن تزويدها إلا من عند طرفي الكبل. وفي عام 1956م تم مد أول كيبل بحري محوري بين أوروبا وأمريكا الشمالية عبر المحيط الأطلسي بطول 3500 كيلومتر وبسعة 50 مكالمة هاتفية و آخر في عام 1957م بين

Figure 6.9 *Analog hierarchy*

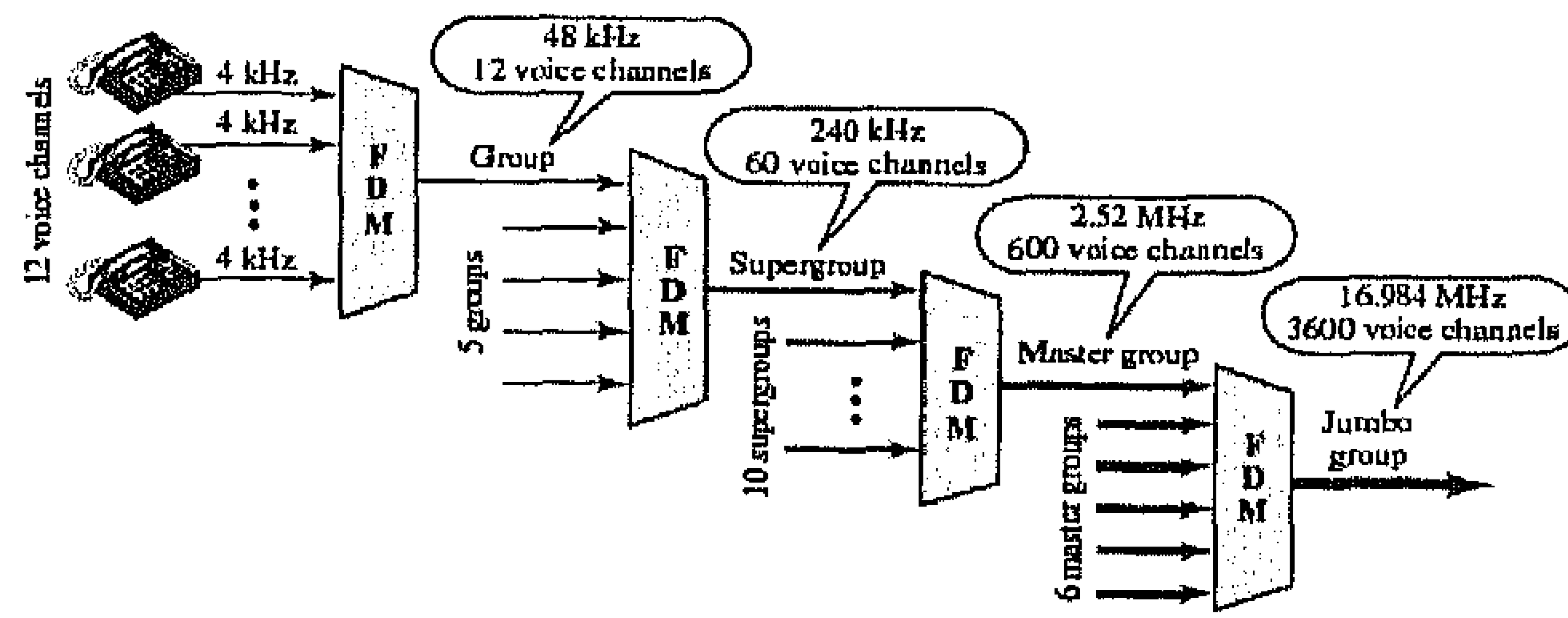
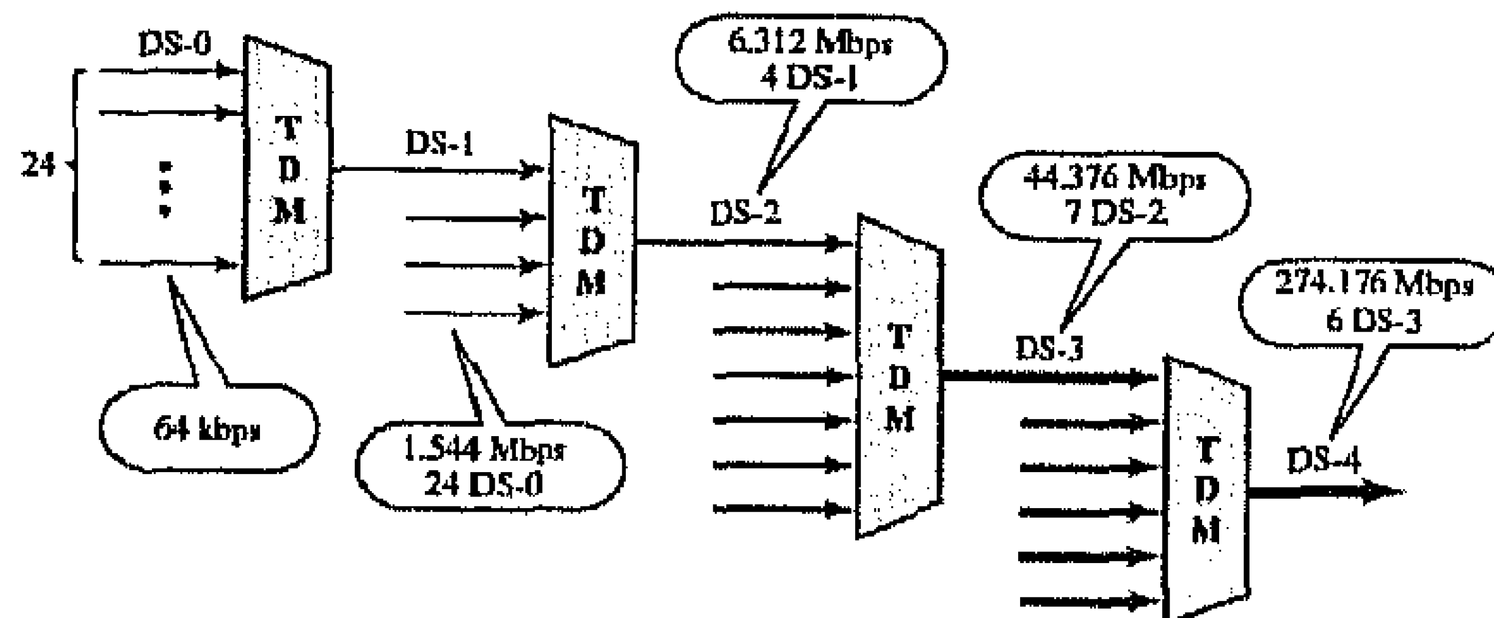
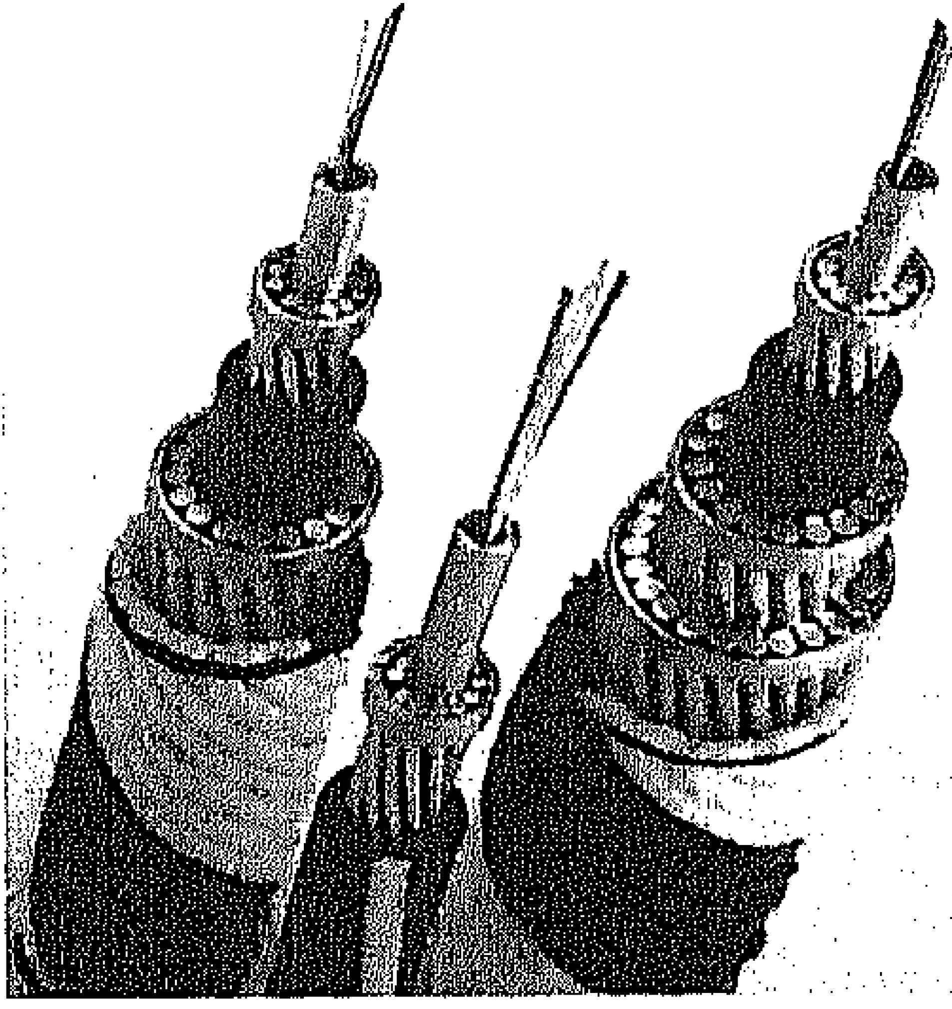


Figure 6.23 *Digital hierarchy*



كاليفورنيا في غرب الولايات المتحدة وبين جزيرة هاواي عبر المحيط الهادي بطول 3600 كم وبنفس السعة. وفي عام 1964م تم مد أول كبل بحري محوري من هاواي إلى اليابان بطول عشرة آلاف كيلومتر وبسعة 128 مكالمة وكانت المسافة بين المعيدات في هذه الأنظمة تتراوح ما بين عشرة كيلومترات وثلاثون كيلومتر. وآخر ما تم مده من الكبلات البحرية المحورية فقد كان بين بريطانيا والولايات المتحدة بسعة أربعة آلاف مكالمة في عام 1983م وما بين كندا واستراليا بطول خمسة عشر ألف كيلومتر وبسعة 1380 مكالمة في عام 1984م بعدها توقف استخدامها في أنظمة الاتصالات بعيدة المدى بعد استخدام الألياف الضوئية في بداية الثمانينات. وفي بداية ظهورها تم لهدف نقل المكالمات الهاتفية استخدام تعاقب تقسيم التردد (FDM)مع نظام تراتب تشابهي (FDM hierarchy). ومع ظهور التقنية الرقمية تم استخدام تعاقب تقسيم الزمن (TDM) مع نظام تراتب رقمي (TDM hierarchy).

أنظمة اتصالات الألياف الضوئية (Fiber Optic Communication Systems)

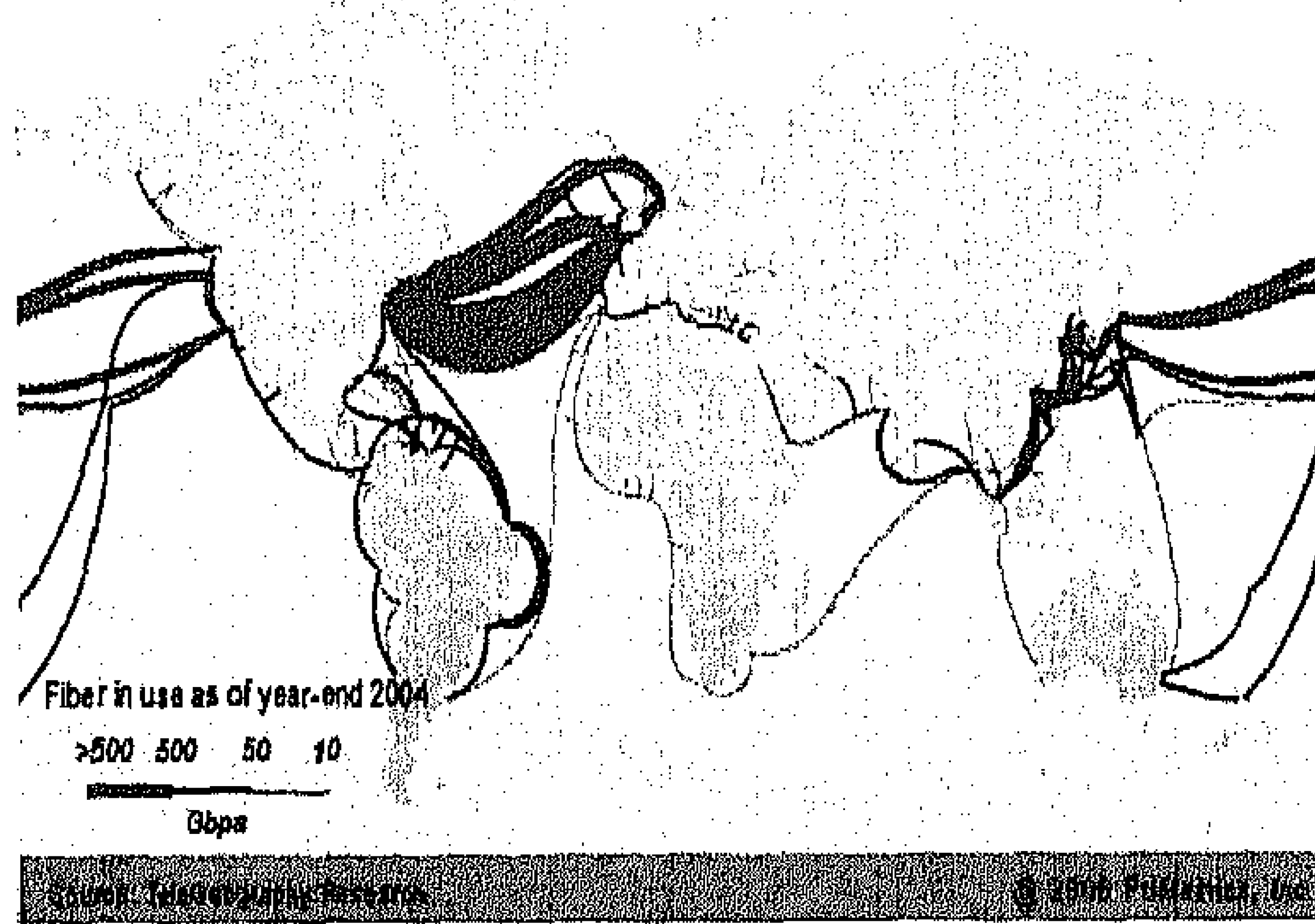


لقد بقيت فكرة استخدام الموجات الضوئية في أنظمة الاتصالات حلما يراود المهندسون لما لها من ترددات عالية قادرة على حمل كمية معلومات تزيد بآلاف المرات عن تلك التي تحملها الحاملات الراديوية. ومع اختراع الليزر في عام 1960م كمصدر للضوء المترابط أحادي اللون قام المهندسون باستخدامه أولا في أنظمة اتصالات ضوئية جوية ولكن وبسبب تأثر الضوء الكبير بالعوامل الجوية نتيجة للقصر المتناهي لطول موجته فقد اقتصر استخدام هذه الأنظمة في تطبيقات محددة كما في أجهزة التحكم بالتلفزيونات. وفي عام 1967م اقترح باحثان إنكليزيان استخدام الألياف الزجاجية كقناة اتصالات ضوئية شريطة تقليل الفقد العالي في الزجاج بالتخلص من الشوائب الموجودة فيه وقد تمكنت شركة أمريكية في عام 1970م من تقليل فقد الزجاج من ألف ديسيبل إلى ما دون عشرين ديسيبل لكل كيلومتر فتجددت آمال المهندسين في تصميم أنظمة اتصالات ضوئية باستخدام هذه الألياف الزجاجية. لقد رافق هذا التطور في تقنية الألياف الزجاجية تطورات في تقنيات المصادر والكواشف الضوئية المصنعة من المواد شبه الموصلة والتي تتميز بصغر حجمها الذي يتناسب مع حجم الليف الزجاجي ولذا فقد تمكنت إحدى الشركات الأمريكية في عام 1975م من إجراء أول تجربة ميدانية ناجحة لنظام اتصالات ضوئي باستخدام الألياف الزجاجية. تمتاز الألياف الضوئية على الكبلات المحورية والأسلاك النحاسية بقلة فقدها واتساع عرض نطاقها وصغر حجمها وخفة وزنها وحصانتها ضد التداخل والتشويش ووفرة مادتها الخام وانعدام خطرها في إحداث الحرائق وعدم حاجتها للعزل إلا لأغراض حمايتها من التلف.

ويستخدم الآن في أنظمة الاتصالات الضوئية ثلاثة أنواع من الألياف الضوئية وهي الليف متعدد الأنماط ذي المعامل الفوري (step-index multi mode fiber) والذي يتراوح قطر قلبه بين 50 و100 ميكرومتر وقطر غلافه 125 ميكرومتر ويمتاز بسهولة تصنيعه وسهولة وصل الألياف ببعضها ولكن سيئته أنه يسمح بانتشار عدة مئات من الأنماط خلاله والتي تعمل على تقليل عرض نطاقه لعدة مئات ميغاهيرتز .

أما النوع الثاني فهو الليف متعدد الأنماط ذي المعامل التدريجي (graded-index multi mode fiber) والذي يتراوح قطر قلبه بين 50 و60 ميكرومتر وقطر غلافه 125 ميكرومتر. وعلى الرغم من أن هذا النوع يسمح بانتشار عدة مئات من الأنماط خلاله كما في النوع الأول إلا أن التدرج في معامل انكسار القلب يجعل سرعات انتشار الأنماط المختلفة أكثر تقاربا منها في النوع الأول وعليه فان عرض نطاقه قد يصل إلى ألف ميغاهيرتز. أما النوع الثالث فهو الليف أحادي النمط ذي المعامل الفوري (step-index single mode fiber) ولا يزيد قطر قلب هذا الليف عن 10 ميكرومتر وقطر غلافه 125 ميكرومتر ولذلك فهو لا يسمح إلا لنمط ضوئي واحد للانتشار خلاله ولذلك فهو يمتاز بقدرته على نقل كميات ضخمة من المعلومات وقد يصل عرض نطاقه إلى عدة آلاف ميغاهيرتز ولكن سيئته أنه يحتاج لتقنيات متقدمة لتصنيعه ولوصل الألياف ببعضها.

استخدمت أنظمة اتصالات الألياف الضوئية في جيلها الأول موجات الأشعة تحت الحمراء في النافذة التي تقع حول 850 نانوميتر ولكن وبسبب الفقد العالي للزجاج في هذه النافذة تم الانتقال في بداية الثمانينات إلى الطول الموجي 1300 نانوميتر ومن ثم الطول الموجي 1550 نانوميتر حيث يصل فقد الزجاج إلى حده الأدنى وهو 0,2 ديسبل لكل كيلومتر. وفي بداية الثمانينات بدأت شركات الاتصالات باستخدام الألياف الضوئية بدلا من الكبلات المحورية في مختلف أنظمة الاتصالات كربط المقاسم المحلية والوطنية والدولية وإنشاء شبكات المعلومات وشبكات التوزيع التلفزيونية ونظم الاتصالات الداخلية في الطائرات والسفن وفي أنظمة الاتصالات العسكرية بحيث وصل طول مجموع ما تم مده من ألياف ضوئية في العالم مع نهاية عام 1987م خمسة ملايين كيلومتر ووصل الرقم إلى عشرين مليون كيلومتر مع نهاية عام 1999م. وفي عام 1988م تم مد أول كيبل بحري باستخدام الألياف الضوئية يربط أميركا مع أوروبا بطول ستة آلاف كيلومتر وبسعة أربعين ألف مكالمة هاتفية وبلغت المسافة بين المعيدات 50 كيلومتر. وفي بداية التسعينات بدأ استخدام المضخمات الضوئية (optical amplifiers) بدلا من المعيدات الإلكترونية في تقوية الإشارات الضوئية مما ساعد في تصميم أنظمة اتصالات ألياف ضوئية يصل مداها لآلاف الكيلومترات وتصل المسافة بين المضخمات الضوئية إلى مائة كيلومتر. ولقد سهلت المضخمات الضوئية استخدام تقنية تعاقب التقسيم الموجي (wavelength division multiplexing (WDM)) الذي يسمح بزيادة كمية المعلومات المرسلة على نفس الليف بإضافة موجات حاملة جديدة قد يصل عددها إلى عشرات الموجات والتي تستطيع كل منها حمل مئات الآلاف من المكالمات الهاتفية وبهذا أصبح بإمكان الليف الزجاجي نقل أكثر من مليون مكالمة هاتفية في نفس الوقت.



وبسبب الطلب المتزايد على خدمات الإنترنت فقد أصبحت الحاجة ماسة لمد مزيد من كبلات الألياف الضوئية البرية منها والبحرية وبدأت كثير من شركات الاتصالات العالمية بتنفيذ مشاريع عملاقة للكبلات الضوئية تربط جميع القارات ببعضها. فعلى سبيل المثال تم مد الكبل الضوئي (فلاق-1) في عام 1997م بين بريطانيا واليابان مرورا بالساحل الغربي لأوروبا وعابرا البحر الأبيض المتوسط والبحر الأحمر وبحر

العرب والمحيط الهندي بطول 27 ألف كيلومتر وبسعة 20 جيقابت في الثانية (كل جيقابت في الثانية يعادل 15 ألف مكالمة هاتفية غير مضغوطة) وتم مد الكبل الضوئي (عبر الأطلسي-1) في عام 1998م بين أمريكا الشمالية وأوروبا بطول 14 ألف كيلومتر وبسعة 40 جيقابت في الثانية وتم رفع السعة إلى 80 جيقابت في الثانية في نهاية عام 1999م. وقد تم مد سلسلة من الكيبلات الضوئية تمتد من شرق أسيا إلى الشرق الأوسط ثم إلى غرب أوروبا كان أخر ما مد منها الكيبل المسمى (SEA-ME-WE 4) والذي بدأ في الخدمة عام 2005م ويبلغ طوله تسعة عشر ألف كيلومتر وبسعة خيالية تبلغ 1280 جيقابت حيث أنه يتكون من أربعة شعيرات تحمل كل شعيرة 64 موجة وكل موجة تحمل 10 جيقابت في الثانية في اتجاه واحد. وقد تم مد الكبل الضوئي تقاطع الهادي-1 (Pacific Crossing 1) في عام 2001م بين أمريكا الشمالية واليابان بطول 21 ألف كيلومتر وبسعة 180 جيقابت وسينتهي العمل في عام 2008م من مد الكبل الضوئي عبر الهادي السريع((Trans Pacific Express (TPE) بطول ثمانية عشر ألف كيلومتر وبسعة 2560 جيقابت وبقطر سنتمترين اثنين فقط. ويوجد الآن مئات الكبلات الضوئية التي تربط مختلف قارات وجزر العالم وهنالك مشروع ضخم بوشر العمل به لمد كبل ضوئي بري بحري حول العالم لربط 170 دولة بطول 275 ألف كيلومتر وبسعة تصل إلى ألف جيقابت في الثانية أي ما يعادل 15 مليون مكالمة هاتفية غير مضغوطة. وتتميز الكيبلات الضوئية بصغر قطرها فهو لا يتجاوز عدة سنتيمترات مما يسهل من عملية مدها في المحيطات ولكن هذا القطر الصغير قد يعرضها للقطع بسهولة كما حدث مع بعض الكبلات في أكثر من مكان والذي تسبب في تعطل لخدمة الإنترنت لفترات زمنية طويلة.

SONET		SDH	Data rate (Mbps)		
Electrical	Optical	Optical	Gross	SPE	User
STS-1	OC-1		51.84	50.112	49.536
STS-3	OC-3	STM-1	155.52	150.336	148.608
STS-9	OC-9	STM-3	466.56	451.008	445.824
STS-12	OC-12	STM-4	622.08	601.344	594.432
STS-18	OC-18	STM-6	933.12	902.016	891.648
STS-24	OC-24	STM-8	1244.16	1202.688	1188.864
STS-36	OC-36	STM-12	1866.24	1804.032	1783.296
STS-48	OC-48	STM-16	2488.32	2405.376	2377.728

ولقد بلغت السعة الكلية للألياف الضوئية بين أمريكا وأوروبا في عام 1994م 5 جيقابت في الثانية وارتفعت إلى 45 جيقابت في الثانية في عام 1998م و150 جيقابت في الثانية في عام 1999م وقد تجاوزت السعة في عام 2005م حاجز 5000 جيقابت في الثانية. وتبلغ السعة الكلية لجميع الكبلات الضوئية البحرية في عام 2007م سبعة ملايين جيقابت في الثانية يستخدم منها فقط مليوني جيقابت في الثانية وتمثل حركة بيانات الإنترنت سبعين بالمائة منها. وتم كذلك بناء شبكات ضوئية أرضية تربط الدول المتجاورة ببعضها كما في الشبكة الضوئية الأوروبية التي تربط كبرى المدن الأوروبية من خلال كبل ضوئي بطول 45 ألف كيلومتر وبسعة 160 جيقابت في الثانية والشبكة الأمريكية التي تربط جميع ولايات أمريكا الشمالية.

لقد حلت الألياف الضوئية إلى حد كبير مشكلة عرض النطاق اللازم لنقل كميات كبيرة من المعلومات حيث أصبح بالإمكان نقل ما يعادل مليون مكالمة هاتفية من المعلومات على ليف زجاجي بحجم شعرة الإنسان وسيرتفع هذا الرقم أضعافا مضاعفة بسبب التطور المستمر في تقنيات تعاقب التقسيم الموجي والمضخمات الضوئية. ولولا الألياف الضوئية لما انتشرت خدمة الانترنت هذا الانتشار الواسع فقد أصبحت الكيبلات البحرية الضوئية وشبكات الألياف الضوئية البرية العمود الفقري الذي يربط عقد شبكة الانترنت.

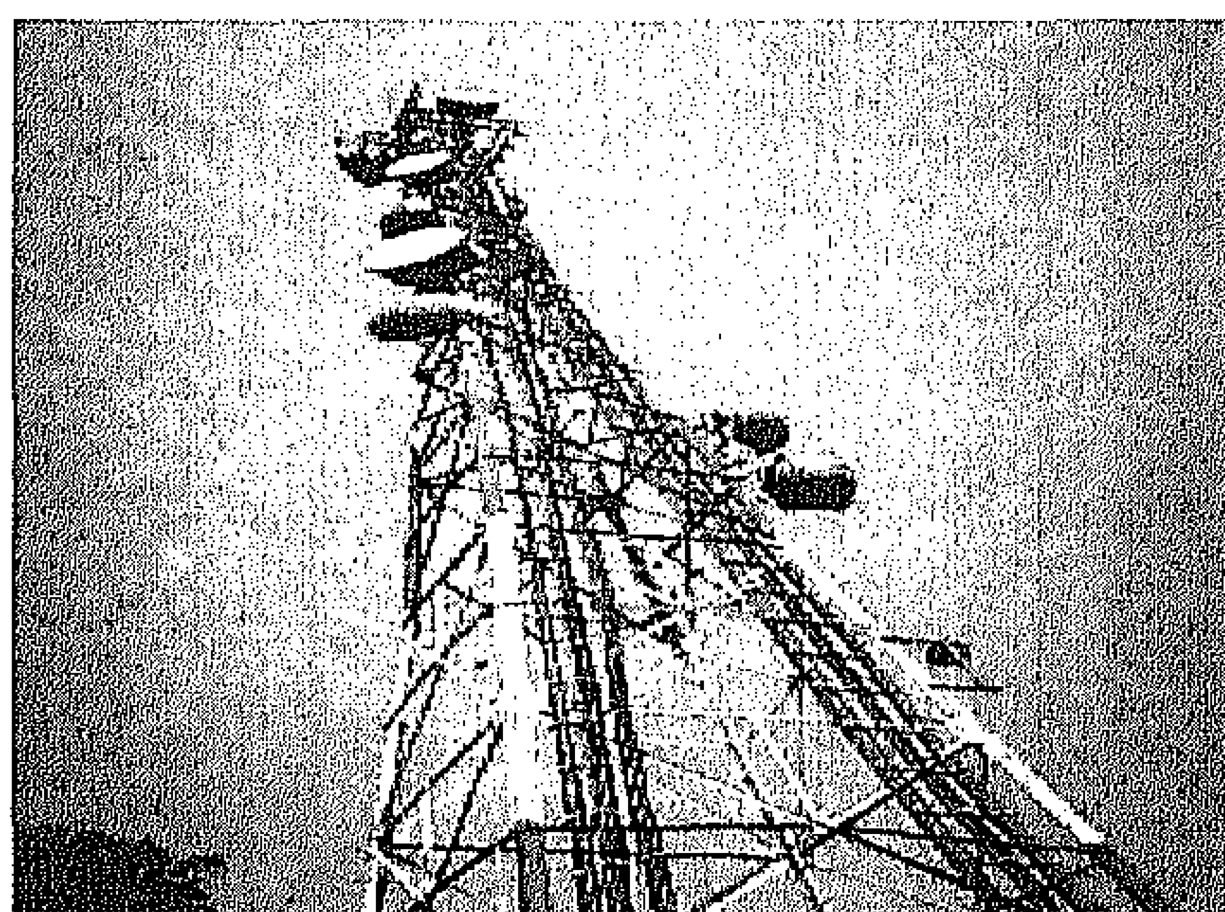
ونظرا للسعة الضخمة للكوابل الضوئية فقد تم استخدام نظام تراتب رقمي جديد (TDM hierarchy) يختلف عن ذلك المستخدم في الكوابل المحورية وسمي هذا النظام الشبكة الضوئية المتزامنة (SONET) في أمريكا والتراتب الرقمي المتزامن (SDH) في أوروبا .

5-7 أنظمة التراسل اللاسلكية (Wireless Transmission Systems)

تتميز أنظمة التراسل اللاسلكية بسهولة وسرعة تركيبها حيث يلزم فقط تركيب معدات المرسل والمستقبل وهذا يمكن أن يتم في أيام معدودة كما في أنظمة اتصالات الموجات الدقيقة. أما سيئاتها فهي حاجتها إلى الحصول على موافقة مسبقة من هيئات تنظيم قطاع الاتصالات التي تقوم بتخصيص نطاق ترددات محدد ليعمل عليه النظام. أما السيئات الأخرى فهي إمكانية تعرضها للتشويش المتعمد وغير المتعمد وكذلك تأثر أدائها بالأحوال الجوية المختلفة كالأمطار والثلوج والعواصف الرملية.

أنظمة اتصالات الموجات الدقيقة (Microwave Communication Systems)

لقد كان لاكتشاف الموجات الدقيقة أثناء الحرب العالمية الثانية واستخدامها في أنظمة الرادار الفضل في تطور نظم اتصالات لاسلكية قادرة على نقل المكالمات الهاتفية والإشارات التلفزيونية بدلا من الكيبلات المحورية التي يتطلب مدها جهدا كبيرا ووقتا طويلا خاصة في المناطق ذات التضاريس الصعبة. والموجات الدقيقة هي موجات كهرومغناطيسية تتراوح تردداتها بين واحد جيقاهيرتز وثلاثمائة جيقاهيرتز وتنتشر كموجات فضائية بين هوائيي الإرسال والاستقبال والذي يتطلب وجود رؤيا مباشرة بينهما مما يجعل المسافة القصوى بين الهوائيين لا تزيد عن مائة كيلومتر بسبب كروية الأرض. ولكن هذا التحديد لا يمنع من بناء أنظمة اتصالات موجات دقيقة بعيدة المدى طالما أنه لا يوجد عوائق طبيعية كالبحار والمحيطات تفصل بين المرسل والمستقبل وذلك باستخدام الإرسال متعدد القفزات الذي يستخدم محطات تقوية (معيدات) تعمل على استقبال الإشارات الضعيفة فتضخمها ثم تعيد تبثها باتجاه المعيد الذي يليه حتى تصل إلى المحطة النهائية. وتستخدم أنظمة الموجات الدقيقة تقنيات تختلف عن تلك المستخدمة في بقية أنظمة الاتصالات التي تعمل على الترددات دون واحد جيقاهيرتز حيث أن الكبلات المحورية والهوائيات السلكية لا يمكنها نقل أو بث الموجات الدقيقة ولذا فقد تم استخدام مرشدات الموجات والهوائيات الصحنية بدلا منها إلى جانب استخدام أنواع خاصة من الصمامات لتوليد وتكبير هذه الموجات.

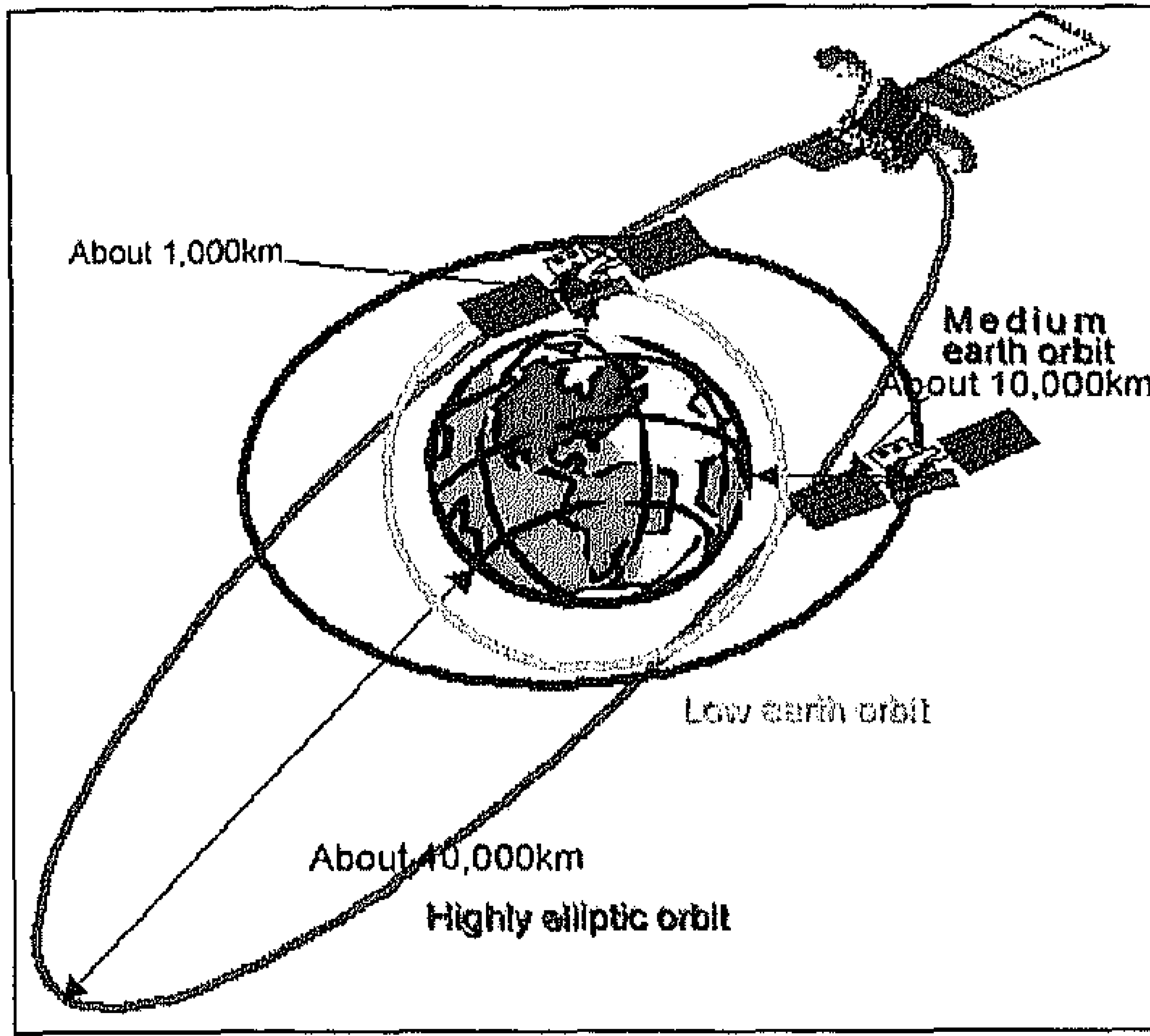


وفي عام 1946م ظهر أول نظام اتصالات موجات دقيقة في أميركا بسعة ثمان مكالمات هاتفية على الحامل الواحد وبدأت هذه الأنظمة بالانتشار السريع بسبب سهولة تركيبها وتم استخدامها في ربط المقاسم المحلية والوطنية والدولية وفي نقل الإشارات التلفزيونية من الاستديوهات إلى محطات البث والتقوية. وفي غضون سنوات قليلة تم رفع عدد المكالمات المحمولة على الحامل الواحد ليصل إلى ألفي مكالمة مع العلم أنه يمكن بث عشرات الحوامل باستخدام نفس الهوائيات ومرشدات الموجات والمضخمات. وفي عام 1976م تم

استخدام التقنية الرقمية في أنظمة الموجات الدقيقة مما زاد من عدد المكالمات المنقولة وزاد من مقاومتها للضجيج والتداخل. وعلى الرغم من أن أنظمة الموجات الدقيقة لم تستخدم فيما بين القارات لصعوبة نصب أبراج المعيدات في المحيطات إلا أنه تم التحايل على هذه المشكلة بوضع معيدات معلقة في الفضاء وهي الأقمار الصناعية.

أنظمة اتصالات الأقمار الصناعية (Satellite Communication Systems)

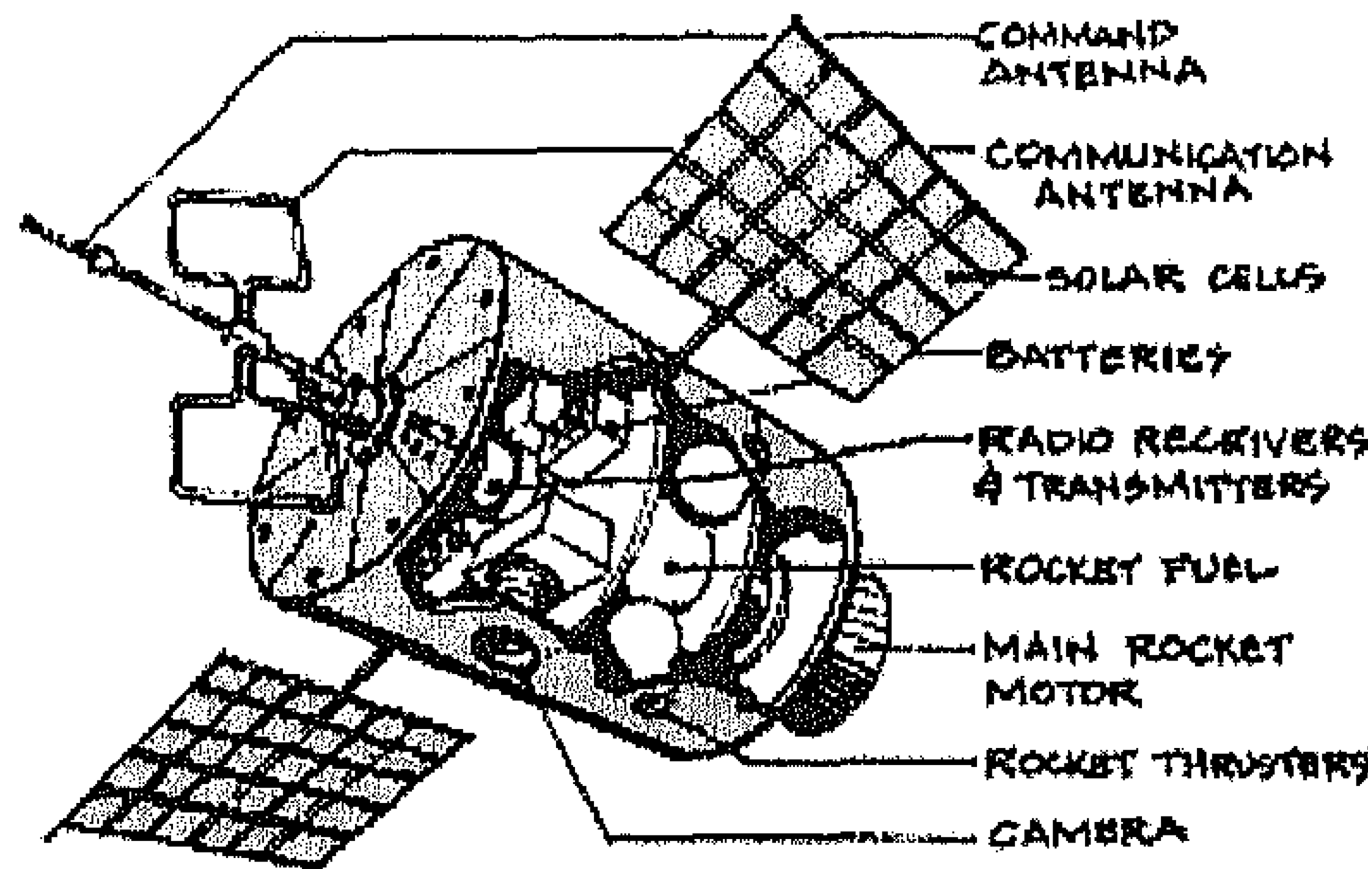
اقترح كاتب الخيال العلمي الإنكليزي أرثر كلارك (Arthur Clarke) في عام 1945م حلا لمشكلة الاتصالات فيما بين القارات وذلك بوضع أقمار صناعية في مدار متزامن حول الأرض لتعمل كمعيدات (repeaters) تقوم باستقبال الإشارات من محطات أرضية ثم تعيد بثها ثانية إلى الأرض لتستلمها محطات أرضية أخرى على بعد آلاف الكيلومترات. ولكن وضع القمر الصناعي في هذا المدار يتطلب وجود صواريخ دفع جبارة لإخراجه من نطاق الجاذبية الأرضية ويتطلب كذلك توفر طاقة كهربائية بشكل دائم لتشغيل أجهزة الاتصالات والمعدات الموجودة فيه. لقد ساعد سباق التسلح بين الدول العظمى في مجال تقنية الصواريخ العابرة للقارات على صناعة صواريخ قادرة على الخروج من نطاق الجاذبية الأرضية مما مكن الاتحاد السوفيتي في عام 1957م من إطلاق أول قمر صناعي تجريبي سبوتنيك 1 (*Sputnik 1*) تم وضعه في مدار أرضي منخفض غير متزامن وتبعته الولايات المتحدة الأمريكية فأطلقت قمرها الصناعي الأول إكسبلورر 1 (Explorer 1) في عام 1958م. ومنذ ذلك الحين بدأ التسابق بين الدولتين لإطلاق أقمار صناعية لشتى الأغراض العسكرية والمدنية والعلمية ففي مجال الاتصالات أطلقت أمريكا في عام 1962م أول قمر صناعي غير متزامن تيليستار 1 أتبعته في عام 1963م بقمر صناعي متزامن سينكوم2 بينما أطلقت روسيا قمرها الصناعي غير المتزامن مولينيا1 في عام 1965م.



والمدار المتزامن هو مدار دائري يقع فوق خط الاستواء على ارتفاع ستة وثلاثون ألف كيلومتر تقريبا وهو المدار الوحيد الذي يبدو فيه القمر ثابتا لمن يشاهده من على الأرض نتيجة لتساوي سرعة دورانه مع سرعة دوران الأرض. وبمجرد أن يتم وضع القمر الصناعي في المكان المخصص له في المدار فإنه يبقى يدور فيه دون الحاجة لقوة دفع جديدة نتيجة لتساوي قوة الطرد المركزي مع قوة الجاذبية الأرضية. ويستطيع القمر الصناعي المتزامن أن يغطي 40 بالمائة من مساحة سطح الأرض وباستخدام ثلاثة أقمار متزامنة يمكن تغطية جميع سطح الأرض باستثناء مناطق صغيرة حول القطبين. ومن ميزات القمر الصناعي المتزامن أنه يستخدم هوائيات ثابتة التوجيه في المحطات الأرضية ولكن بسبب ارتفاعه الكبير يلزمه قدرة بث عالية ويوجد تأخير في وصول الإشارات بين المحطات الأرضية بمقدار ربع ثانية. أما

المدارات غير المتزامنة فهي كل ما عدا المدار المتزامن من مدارات وقد تكون على شكل دائري أو إهليلجي أما ارتفاعاتها فيجب أن تكون فوق الغلاف الجوي (500 كيلومتر) لتجنب الاحتكاك به وخارج نطاق حزام إشعاعات فان ألن (Van Allen Radiation Belt) (بين ألفين وعشرة آلاف كيلومتر) لتجنب الإشعاعات الضارة بالخلايا الشمسية وأجهزة الاتصالات. ولذلك يوجد نوعان من الأقمار الصناعية غير المتزامنة وهي الأقمار منخفضة المدار (500 إلى 2000 كيلومتر) والأقمار متوسطة المدار (بين عشرة آلاف وعشرين ألف كيلومتر). ونظرا لعدم تزامن حركة الأقمار غير المتزامنة مع حركة الأرض فإنها تبدو غير ثابتة لمن يشاهدها من على الأرض مما يستدعي استخدام هوائيات متحركة تقتفي حركة القمر منذ طلوعه حتى غيابه ويلزم لحل مشكلة انقطاع الاتصالات عند غياب القمر استخدام عدة أقمار موزعة بانتظام على محيط المدار بحيث إذا غاب أحدها طلع القمر الذي يليه ليستلم مكانه. ولتغطية جميع سطح الأرض بنظام اتصالات أقمار غير متزامنة يتطلب وجود عدد كبير من الأقمار في عدة مستويات مدارية حيث يلزم أكثر من عشرة أقمار في المدارات المتوسطة وأكثر من أربعين قمرا في المدارات المنخفضة مقابل ثلاثة أقمار في المدار المتزامن. ويوجد الآن حول الأرض ما يزيد عن ثلاثة آلاف قمر صناعي تستخدم لشتى الأغراض كأقمار الاتصالات والأرصاد الجوية والفلك والتجسس وتحديد المواقع والاستشعار عن بعد والأبحاث العلمية.

يحمل القمر الصناعي المستخدم لأغراض الاتصالات عدد من أجهزة الاستقبال والإرسال تسمى المستجيبات (transponders) وعدد من الهوائيات وعدد كبير من الخلايا الشمسية المرصعة على جسم القمر أو على أجنحة ممتدة منه تقوم بتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية تخزن في بطاريات لتشغيل أجهزته المختلفة. ويوجد كذلك أجهزة للتحكم والقياس ومجموعة من الأنابيب المملوءة بالغاز لاستخدامه كقوة دافعة عند نفثه من حين لآخر لمنع القمر



من الانحراف عن المكان المخصص له في المدار. ويخصص لكل قمر محطة أرضية تعمل على مراقبة وضعه في مداره وحالة أنظمته المختلفة من خلال أجهزة قياس ومجسات مختلفة تقوم بإرسال قياساتها إلى المحطة الأرضية التي ترسل الأوامر لتصحيح وضع القمر وإصلاح الأعطال التي قد تصيب أجهزته وكذلك توجيه الهوائيات إلى مناطق التغطية المختلفة على سطح الأرض. ويتحدد عدد المكالمات الهاتفية والإشارات التلفزيونية التي يمكن للقمر نقلها أو بثها من عدد المستجيبات التي يحملها حيث يستطيع المستجيب الذي يبلغ عرض نطاقه في الغالب 36 ميغاهيرتز أن ينقل إشارة تلفزيونية واحدة أو ما يقرب من ألف مكالمة هاتفية باتجاه واحد في حالة استخدام التقنية التشابهية أما في حالة استخدام التقنية الرقمية فيمكن زيادة عدد الإشارات التلفزيونية والمكالمات الهاتفية إلى عشرة أضعاف . ويتحدد عدد المستجيبات التي يمكن للقمر حملها من كمية الطاقة الكهربائية التي تولدها الخلايا الشمسية وتلعب كفاءة الخلايا الشمسية دورا كبيرا في تحديد أحجام هوائيات الإرسال والاستقبال في القمر الصناعي وفي المحطات الأرضية حيث وصلت حديثا إلى ما يزيد عن 30 بالمائة بعد أن كانت لا تتجاوز العشرة بالمائة مما ضاعف من عدد المستجيبات وقلل من أحجام

الهوائيات. يتحدد عمر القمر الافتراضي من كمية الغاز الذي يحمله فمع انتهاء كمية الغاز يصبح من الصعب الحفاظ على القمر في مداره الصحيح ويبلغ عمر الأقمار الصناعية الحديثة سبعة عشر عاما مقابل سبعة أعوام في الأقمار القديمة.

لقد تولت الهيئة الدولية للاتصالات الفضائية إنتلسات (INTELSAT) مهمة تأمين الاتصالات الدولية فيما بين جميع دول العالم وأطلقت الجيل الأول من أقمارها الصناعية المتزامنة في عام 1965م وجيلها الثامن في عام 1997م. وتتكون منظومة انتلسات من أسطول من الأقمار الصناعية يتكون حاليا من سبعة عشر قمرا موزعة على ثلاث مواقع تقع فوق المحيط الأطلسي والهندي والهادي ويمكن لأي دولة الاتصال ببقية دول العالم من خلال هوائيين موجهين لموقعين من هذه المواقع الثلاث ويبلغ عدد المستجيبات على القمر الواحد من أقمار الجيل الثامن 44 مستجيبا تقوم بنقل ثلاث قنوات تلفزيونية وخمسة وأربعون ألف دائرة هاتفية باتجاه واحد. ومن المتوقع أن تقوم انتلسات بإطلاق الجيل التاسع من أقمارها ابتداء من منتصف عام 2000م حيث يبلغ عدد المستجيبات التي يحملها القمر الواحد 96 مستجيبا أي ما يزيد عن ضعف ما تحمله أقمار الجيل الثامن. وإلى جانب خدمة انتلسات قامت كثير من الدول باستخدام أقمار صناعية خاصة بها لتأمين اتصالاتها الداخلية والخارجية مع الدول المجاورة فقد أطلق الفرنسيون قمرهم في عام 1965م والكنديون في عام 1967م والألمان في عام 1969م واليابانيون والصينيون في 1970م والإنكليز في عام 1971م والهولنديون والأسبان في عام 1974م والهنود والأندونيسيون في عام 1976م والعرب والبرازيليون في عام 1985م والسويديون في عام 1986 والإسرائيليون في عام 1988م والباكستانيون والأرجنتينيون في عام 1990م والكوريون في عام 1992م والبرتغاليون في عام 1993م والأتراك في عام 1994م والماليزيون في عام 1996م. لقد تولت الأقمار الصناعية مهمة نقل المكالمات الدولية لما يزيد عن 25 عاما ولكن مع مد أول كيبل بحري باستخدام الألياف الضوئية يربط أميركا مع أوروبا بطول ستة آلاف كيلومتر وبسعة أربعين ألف مكالمة هاتفية بدأ التحول عن الأقمار الصناعية إلى كيبلات الألياف الضوئية لنقل المكالمات الهاتفية الدولية. ولكن هذا التحول لم يفقد الأقمار الصناعية أهميتها ففي مطلع الثمانينات بدأ استخدام الأقمار الصناعية المتزامنة لبث القنوات التلفزيونية مباشرة إلى المنازل من خلال مئات الأقمار التي تبث آلاف القوات التلفزيونية التشابهية والرقمية. وفي نهاية التسعينات بدأ باستخدام الأقمار الصناعية المتزامنة وغير المتزامنة لتقديم خدمة الهاتف النقال وخدمة الإنترنت.

8-5 أنظمة الاتصالات الخاصة

من الصعب حصر أوجه استخدام أنظمة الاتصالات حيث أنها وبسبب تدني كلفتها وصغر حجمها وقلة استهلاكها للطاقة بدأت تدخل في تطبيقات متعددة فساعدت على القيام بمهام كان يصعب القيام بها إلى جانب تقليلها للجهد والمال اللازمين للقيام بمثل هذه المهام. ففي الملاحة الجوية تساعد أنظمة الاتصالات أبراج المراقبة في المطارات على متابعة حركة الأعداد الضخمة من الطائرات الداخلة في أجوائها فتقوم بترتيب مواعيد إقلاعها وهبوطها بشكل دقيق وتقوم بمتابعة حركتها بين المحطات المختلفة مما قلل كثيرا من حوادث الطيران. وفي الملاحة البحرية جنبت أنظمة الاتصالات السفن التجارية وناقلات النفط كثيرا من المشاكل والخسائر المادية أثناء عبورها للبحار والمحيطات وجنبت الموانئ كثيرا من الاختناقات والتصادمات بين السفن. وبفضل أنظمة الاتصالات أصبح تحديد الموقع يتم بدقة متناهية باستخدام نظام تحديد الموقع

العالمي ((Global Positioning system (GPS)) الذي يحدد خط الطول وخط العرض والارتفاع في أي مكان على سطح الكرة الأرضية من خلال 24 قمرا صناعيا موضوعة في ستة مدارات أرضية متوسطة تقوم ببث إشارات توقيتية بشكل منتظم إلى الأرض فيتم استقبال بعضها بجهاز يدوي بسيط. ولقد تم استخدام هذا النظام في السفن والطائرات والشاحنات والمركبات والآليات العسكرية والسيارات وحتى الأشخاص حيث لا يتجاوز كلفة بعض أجهزة تحديد الموقع المائة دولار. وفي رحلات استكشاف الفضاء ساعدت أنظمة الاتصالات على إرسال مركبات فضائية إلى القمر وإلى كواكب المجموعة الشمسية حيث تقوم أنظمة الاتصالات بنقل الأوامر من المحطات الأرضية إلى المركبات الفضائية للتحكم بمسار سيرها وبنقل البيانات والمعلومات التي تجمعها أجهزة الاستكشاف إلى المحطات الأرضية. ويعتبر تصميم أنظمة الاتصالات المركبات الفضائية تحديا للمهندسين وذلك لبعد المسافات بين المرسلات والمستقبلات والتي تصل إلى ملايين الكيلومترات ولقلة الطاقة الكهربائية المتوفرة على ظهر المركبة والتي يتم توفيرها باستخدام الخلايا الشمسية أو باستخدام المولدات الكهروحرارية. وعلى الرغم من كل هذه الصعوبات فقد تم إرسال عدد كبير من المركبات الفضائية إلى القمر وإلى جميع كواكب المجموعة الشمسية وقامت بإرسال معلومات وصورا عن أجوائها وطبيعة سطوحها وتربتها وتم كذلك وضع عدد من الأقمار الصناعية والمحطات الفضائية حول الأرض تحمل مقاريب ضوئية وراديوية وأجهزة رصد واستشعار تقوم بالتقاط كل ما يصدر عن أجرام الكون من إشعاعات فزودت العلماء بمعلومات قيمة عن الكون لم يكن بإمكانهم الحصول عليها من على سطح الأرض بسبب جو الأرض الذي يمتص كثيرا من هذه الإشعاعات التي تحمل بصمات تاريخ تطور الكون.

وفي أنظمة الأرصاد الجوية توجد شبكة من الأقمار الصناعية ومحطات الرصد الأرضية الموزعة على أنحاء الكرة الأرضية تقوم بجمع كميات ضخمة من الصور والبيانات عن الحالة الجوية في مختلف مناطق العالم فيتم إرسالها إلى دوائر الرصد الجوي التي تقوم بمعالجتها وتوزيعها على الجهات المعنية لأخذ الاحتياطات اللازمة لمواجهة الظروف الجوية والتقليل من عواقب الكوارث الطبيعية وحوادث الطائرات والسفن والقطارات والمركبات. وفي المجال الطبي تستخدم أنظمة الاتصالات في مراقبة حالات المرضى في المستشفيات وفي البيوت وأماكن العمل من خلال أجهزة قياس محمولة يتم إرسال قراءتها بشكل متواصل لغرف المراقبة وتستخدم كذلك في ما يسمى بخدمة التطبيب عن بعد حيث يمكن للأطباء المختصين القيام بفحص المرضى من على بعد مئات أو آلاف الكيلومترات من خلال أنظمة اتصالات سمعية ومرئية متقدمة مما جنب المرضى والأطباء عناء وتكاليف السفر وسيتم في القريب العاجل إجراء بعض العمليات الجراحية من على بعد باستخدام الروبوتات الآلية. وفي أنظمة الحماية ضد السرقات والحرائق تستخدم أنظمة الاتصالات في نقل الإشارات الصادرة عن كميرات المراقبة وأجهزة الإنذار في البنوك والمصانع والمتاجر والبيوت إلى غرف المراقبة في المراكز الأمنية ومراكز الدفاع المدني مما قلل كثيرا من خسائرها وكلفة حمايتها. وفي شركات الكهرباء تستخدم أنظمة الاتصالات للمراقبة والتحكم في الأجهزة والمعدات الموجودة في محطات التوليد والتحويل ومحطات الربط وخطوط النقل وتستخدمها أيضا في قراءة العدادات المختلفة بما فيها عدادات المنازل ونقلها إلى مراكز الحوسبة. وتستخدم أنظمة الاتصالات في ربط البنوك وفروعها ومواقع الصراف الآلي مما سهل على الزبائن إنجاز معاملاتهم المالية. وتساعد أنظمة الاتصالات شرطة السير والدفاع المدني في رفع كفاءة عملها من خلال تسهيل الاتصال فيما بين مراكزها ودورياتها وفي بناء أنظمة مراقبة وتحكم وإنذار متطورة. وفي أنظمة التجسس تستخدم أنظمة الاتصالات لجمع شتى أنواع المعلومات السرية عن الأفراد والأحزاب والهيئات والحكومات والمصانع والجيوش من خلال أجهزة

تنصت ومراقبة تتكون من ميكرفونات وكميرات ومستشعرات ومرسلات يكون بعضها من الصغر بحيث يتم وضعها في ساعة أو قلم أو هاتف الشخص وتستخدم الدول الكبرى الأقمار الصناعية في التجسس على كثير من الدول في جميع أنحاء العالم من خلال التقاط إشارات المعلومات التي تبثها أجهزة اتصالاتها المختلفة العسكرية منها والمدنية.

وتلعب أنظمة الاتصالات دورا بارزا في الأنظمة العسكرية الحديثة حيث ساعدت على اختصار الوقت والمسافات عند تنفيذ العمليات العسكرية وقد يؤدي غيابها أو تعطلها أو سوء استخدامها في ساحة المعركة إلى إلحاق الهزائم بالجيوش والدول. ولقد توسعت ساحات المعارك بشكل كبير نتيجة لاستخدام أنظمة الاتصالات وأصبحت العمليات العسكرية تدار من على بعد آلاف الكيلومترات وقد يتوفر للقيادات العليا من المعلومات عن مجريات المعركة أكثر مما لدى القادة الميدانيين بفضل سيل المعلومات التي تنقلها لهم أنظمة الاتصالات المختلفة. وعلى الرغم من الدور الكبير الذي تلعبه أنظمة الاتصالات في تسهيل العمليات العسكرية إلا أنها قد تكون سببا في هزيمة الجيوش إن لم تأخذ الاحتياطات المناسبة عند استخدامها فالإشارات اللاسلكية المنبعثة من أجهزة الاتصالات تنتشر في كل الاتجاهات متيحة الفرصة للعدو لالتقاطها واستخدامها في تحديد مواقع هذه الأجهزة فيعمل على تدميرها أو التنصت عليها أو التشويش عليها للحيلولة دون وصول المعلومات لوجهتها. ولهذا فإنه إلى جانب حرب النيران الظاهرة التي تدور رحاها بين الجنود والدبابات والمدافع والطائرات والصواريخ هناك حربا إلكترونية صامتة تدور رحاها بين أجهزة الإرسال والاستقبال اللاسلكية عند كلا الجانبين وقد تكون نتيجة المعركة لصالح من يحسن إدارة هذه الحرب الإلكترونية التي تتلخص في مهمتين أساسيتين أولها منع العدو من الاستفادة من الإشارات اللاسلكية المنبعثة من الأجهزة والمعدات اللاسلكية باستخدام طرق مختلفة لتشفير وتعديل وتمويه المعلومات بما يسمى بالإجراءات الإلكترونية وثانيها مراقبة جميع الإشارات اللاسلكية المنبعثة من أجهزة ومعدات العدو لتحديد مواقعها وتدميرها أو التنصت عليها أو التشويش عليها لمنعه من الاستفادة منها بما يسمى بالإجراءات الإلكترونية المضادة. وتخضع أنظمة الاتصالات العسكرية عند تصنيعها لشروط قاسية من حيث اختيار نوعية المواد والأجهزة لكي تعمل بموثوقية عالية تحت أقسى الظروف المناخية وعليها أن تتسم بخفة الوزن وصغر الحجم وبالمتانة وبقلة استهلاكها للطاقة لكي تعمل لفترات طويلة على البطاريات. أما الصفة المميزة لها فهي حاجتها لنقل المعلومات بين الوحدات المختلفة بأقصى درجات السرية والموثوقية لكي لا يتمكن العدو من كشف وتشويش وتبديل المعلومات العسكرية ولذلك فهي تستخدم على خلاف أنظمة الاتصالات المدنية طرق معقدة للتعديل والتعاقب والتشفير كأنظمة اتصالات الطيف الممتد. وقد تلجأ الجيوش لاستخدام الأنظمة السلكية كالأسلاك والكبلات المحورية وكبلات الألياف الضوئية لنقل المعلومات بين الأفراد والآليات ضمن مناطق جغرافية محدودة لتقليل إمكانية التنصت والتشويش عليها ولكن مقابل التأخير الناتج عن مدها وتقيدها لحركة مستخدميها وذلك على عكس الأنظمة اللاسلكية التي تعطي حرية كبيرة لتحرك الآليات والأفراد. ومع انتشار أنظمة الأقمار الصناعية بدأت تلعب دورا بارزا في تقديم شتى الخدمات للأغراض العسكرية كنقل المعلومات العسكرية من خلال هوائيات صغيرة تنصب في ساحة المعركة لتأمين الاتصال بين طرفين موجودين في ساحة المعركة أو على بعد آلاف الكيلومترات وفي تحديد مواقع الأهداف بدقة متناهية باستخدام أقمار أنظمة تحديد الموقع وفي تصوير المواقع والأهداف باستخدام أقمار الرصد والتجسس.

وفي أنظمة النداء اللاسلكية يتم استخدام نظام اتصالات لاسلكي للتواصل مع العاملين في المستشفيات والمصانع والمناجم وسائقي الحافلات وسيارات الأجرة. ويتكون نظام النداء اللاسلكي من جهاز إرسال واحد وعدد كبير من أجهزة الاستقبال اللاسلكية المحمولة من قبل الأشخاص المتجولين حيث يستلم عامل الإرسال رسائل النداء فيقوم بإرسالها لاسلكيا على التعاقب إلى الأشخاص المعنيين ولضمان وصول الرسالة للشخص المعني فقط وعدم استقبالها من بقية المشتركين فقد تم تخصيص شيفرة خاصة لكل جهاز استقبال بحيث يستجيب الجهاز المعني فقط للرسالة المبثوثة. يعمل الجيل الأول من أنظمة النداء اللاسلكية على تنبيه الشخص المنادى من خلال إصدار لحن مميز من جهازه فيعرف أنه مطلوب من قبل شخص ما فيقوم بالاتصال من خلال أقرب هاتف عام بعامل الإرسال لمعرفة الرسالة أو الاتصال بالشخص المعني. أما الجيل الثاني والذي ظهر في بداية الثمانينات فقد تم تزويد أجهزة الاستقبال بشاشات رقمية يمكن من خلالها إظهار رقم الشخص الطالب الذي يتم إرساله من خلال عامل الإرسال أو آليا بإدخال رقم جهاز المنادى ورقم الشخص الطالب عن طريق جهاز الهاتف فيقوم المنادى بالاتصال بالشخص الطالب مباشرة دون الرجوع إلى عامل الإرسال. وفي التسعينات ظهر الجيل الثالث والذي يستطيع استقبال رسائل مكتوبة يتم إظهارها على شاشة جهاز الاستقبال وبذلك تم تجنيب الشخص المنادى البحث عن هاتف عام للاتصال بعامل الإرسال أو حتى بالشخص الطالب إذا كانت الرسالة واضحة والتي يجب أن لا تتعدى عدد معين من الكلمات ولكن هذا النوع لم ينتشر كثيرا بسبب ضرورة توفر جهاز حاسوب مرتبط مع خط الهاتف عند الشخص الطالب وذلك لإدخال كلمات الرسالة أو القيام بالاتصال بعامل الإرسال لإملاء الكلمات المراد إرسالها. أما الجيل الرابع فيعمل على إرسال رسالة صوتية يتم إملاؤها من قبل الشخص الطالب من خلال جهاز الهاتف فتقوم أجهزة في مركز الإرسال باستلامها وإرسالها إلى جهاز الاستقبال الذي يقوم بتخزينها في الذاكرة لحين سماعها من قبل الشخص المنادى. تتميز أنظمة النداء اللاسلكية ببساطتها وقلة كلفتها حيث يمكن لجهاز إرسال يعمل على تردد واحد تغطية مدينة كاملة ولذا فقد انتشرت انتشارا واسعا في جميع دول العالم حيث قدر عدد المشتركين بهذا النظام بخمسين مليون في عام 1999م.

الفصل السادس

البث الإذاعي والتلفزيوني

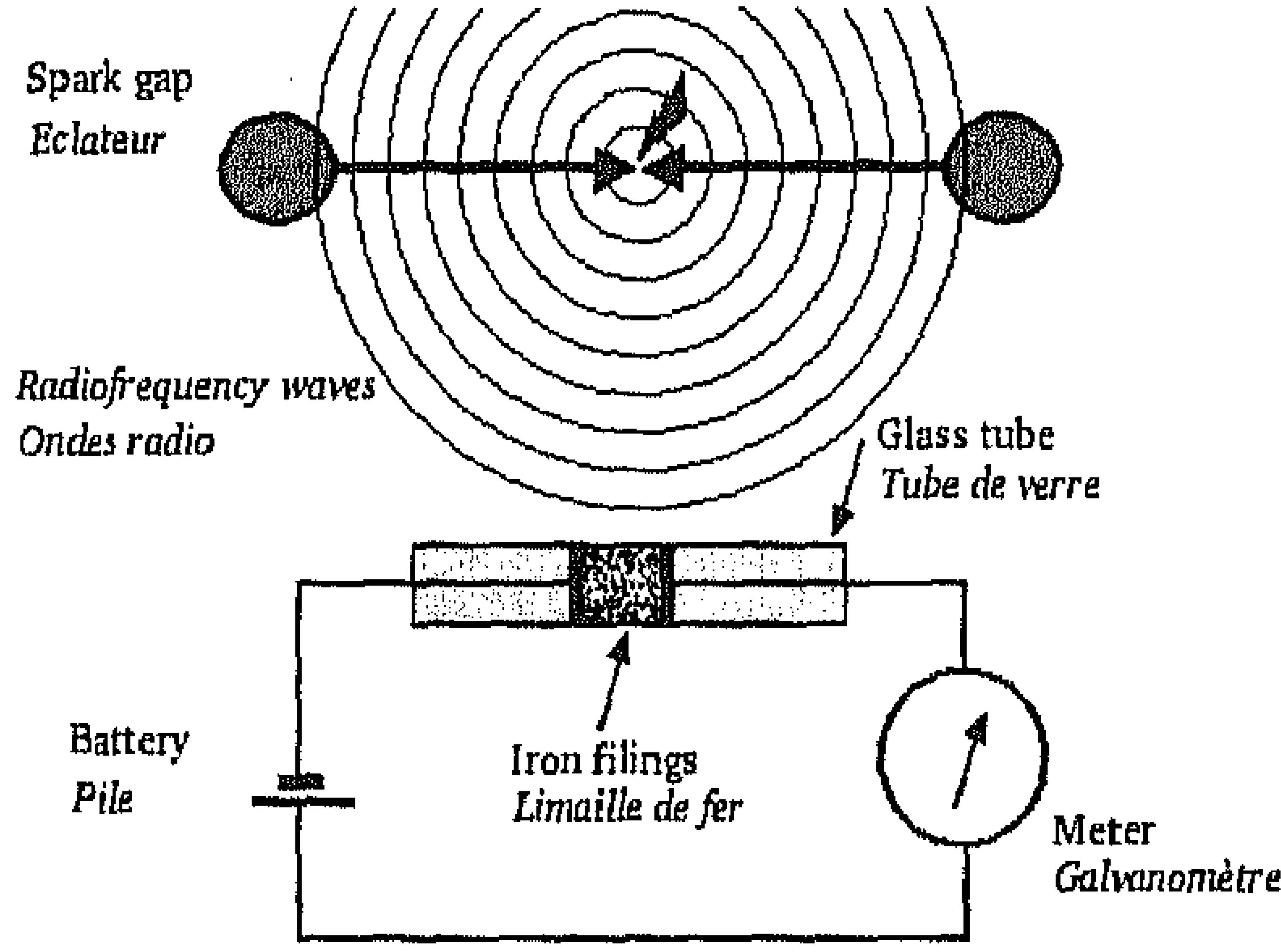
6-1 تمهيد

لقد كانت الوسيلة الوحيدة لنقل أخبار ما يحدث في العالم من أحداث قبل اختراع الراديو والتلفزيون هي من خلال تناقلها كأحاديث شفوية أو كرسائل مكتوبة فيما بين الناس أو من خلال الصحف المنشورة وذلك بعد ظهور الصحافة. وغالبا ما يصيب هذه الأخبار كثيرا من التشويه بسبب النسيان أو بسبب الزيادة والحذف المقصودين من قبل الأشخاص الناقلين لها. هذا إلى جانب التأخير الكبير في وصول هذه الأخبار وذلك بسبب اعتمادها على وسائط النقل التي لا تتجاوز سرعتها في أحسن الأحوال عدة مئات من الكيلومترات إذا ما تم استخدام الطائرات. ومن الطبيعي في هذا الحال أن تقل الأخبار المتوفرة لساكني منطقة معينة عن بقية المناطق كلما زادت المسافة الفاصلة بينها ولذلك فإنه من غير المستغرب أن لا يسمع الناس بكثير من الأحداث الهامة التي حدثت في البلدان أو القارات البعيدة عنهم. أما ما يجري من فعاليات مختلفة في أوساط الناس فإنه لا يمكن للمرء أن يستفيد منها إلا إذا ذهب وشاهدها بنفسه حيث لا فائدة تذكر من أن يقوم شخص بوصف هذه الفعاليات لشخص آخر لم يشهدها كأن يقوم بوصف مهرجان خطابي أو حفلة غنائية أو مسرحية أو مباراة لكرة القدم أو غير ذلك من فعاليات. ومع اختراع نظام البث الراديوي في العشرينيات من القرن العشرين والبث التلفزيوني في الثلاثينيات منه حدثت ثورة عظيمة في نقل كل ما يحدث في هذا العالم من أحداث وما يدور بين الناس من أخبار في لمح البصر وبالصوت والصورة. إن سرعة انتشار أمواج الراديو في الفضاء تبلغ ثلاثمائة ألف كيلومتر في الثانية مما يعني أن نقل الحدث الذي يجري في أقصى بقاع الأرض باستخدام مثل هذه الأمواج لا يتجاوز عشر الثانية إذا ما علمنا أن محيط الأرض يبلغ أربعين ألف كيلومتر. ومن خلال الراديو أو التلفزيون يمكن للمرء أن يسمع أخبار ما يجري في العالم من أحداث قبل أن يسمع أخبار ما يحدث من أحداث في الشارع الذي يقطنه.

بدأ التفكير في استخدام الأمواج الكهرومغناطيسية لبث الإشارات السمعية والمرئية من مرسل واحد إلى عدد كبير من المستقبلات مع اكتشاف الأمواج الكهرومغناطيسية في عام 1890م على يد العالم الألماني هيرتز. ولكن بسبب غياب مولدات الذبذبات (oscillators) كحاملات لهذه الإشارات في المرسلات وكذلك غياب المضخمات (amplifiers) التي تلزم لتكبير الإشارات الضعيفة جدا التي تلتقطها المستقبلات فقد تأخر ظهورها إلى أن تم اختراع الصمام الإلكتروني (electronic valve) في عام 1906م على يد المهندس الأمريكي دي فورست. ويتكون نظام البث من مرسل واحد ذي طاقة بث عالية يقوم ببث المعلومات على شكل موجات كهرومغناطيسية إلى عدد كبير من المستقبلات المزودة بهوائيات الاستقبال المناسبة. وتنتشر الموجات المبثوثة من المرسل إما على شكل موجات سطحية أو سماوية أو فضائية تبعا لقيمة التردد ونوع هوائيات البث المستخدمة. ويستخدم في هذه الأنظمة بعض أنواع التعديل التي تقلل من كلفة تصنيع أجهزة الاستقبال ولكن غالبا ما يقابل ذلك هدرا في طاقة البث وفي عرض النطاق التي تحتله محطات البث.

6-2 البث الإذاعي (Radio Broadcasting)

بدأت المحاولات لاستخدام الموجات الكهرومغناطيسية لنقل إشارات التلغراف والتلفون وبث الإشارات السمعية منذ أن اخترع العالم الألماني هيرتز طريقة لتوليد الموجات الكهرومغناطيسية وذلك في عام 1890م. فقد استخدم هيرتز كرتين معدنيتين بينهما ثغرة (gap) ضيقة جدا لتوليد شرارة كهربائية عند تسليط جهد عالي بينهما فتقوم الشرارة بتوليد طيف واسع من الترددات الكهرومغناطيسية وسمى هذا الجهاز بمرسل ثغرة الشرارة (spark-gap transmitter). وفي عام 1895م تمكن الفيزيائي الروسي اليكسندر بوبوف (Alexander Popov) من اختراع جهاز بسيط لالتقاط الموجات الكهرومغناطيسية سماه المتماسك (coherer) وهو عبارة عن أنبوب مملوء بحبيبات معدنية موضوعة بين قطبين معدنيين وفي حالة عدم وجود مجال كهرومغناطيسي فإن مقاومة المتماسك تكون عالية أما عند تسليط مجال عليه فإن الحبيبات المعدنية تتجاذب وتتماسك فتقل بذلك المقاومة بين القطبين. لقد نجح نظام الإرسال المكون من مرسل ثغرة الشرارة

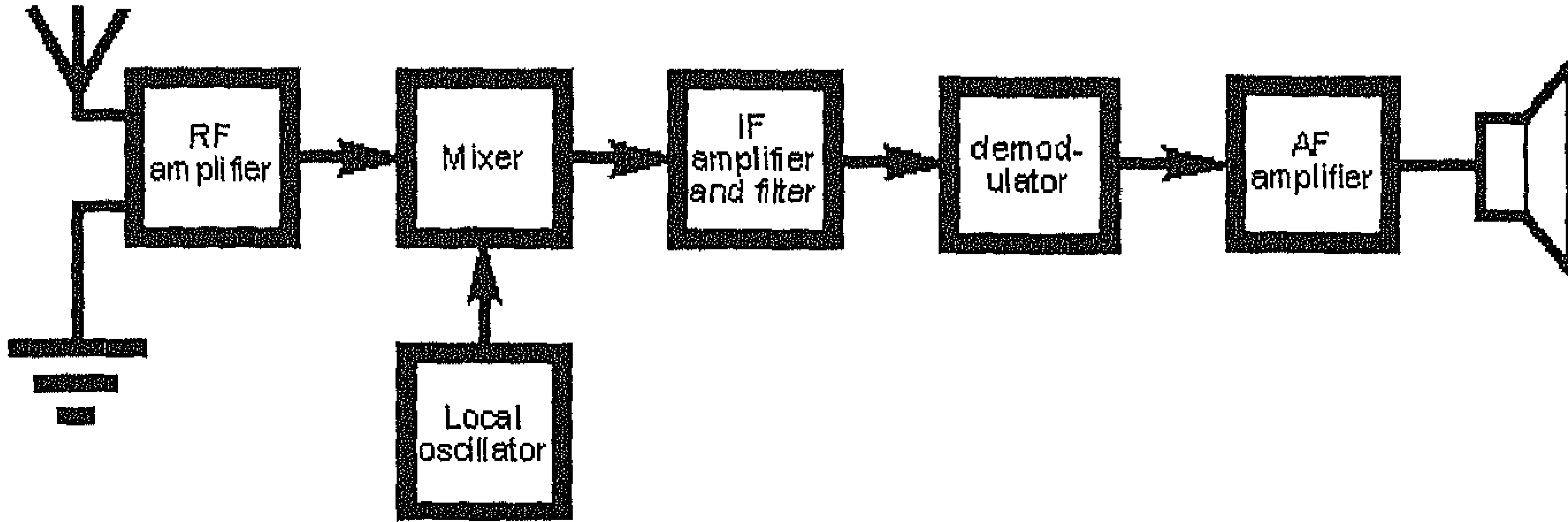


والمستقبل المتماسك في بناء أنظمة التلغراف اللاسلكية بسبب طبيعته الرقمية حيث يتم الإرسال من خلال فتح وقفل الجهد المسلط على الكرتين المعدنيتين إلا أنه فشل في إرسال الإشارات الصوتية.

وبعد اختراع الصمام الإلكتروني في عام 1906م على يد المهندس الأمريكي دي فورست واستخدامه لتوليد الموجات الكهرومغناطيسية أحادية التردد (single frequency) وكذلك كمضخم للإشارات الضعيفة فقد أصبح بناء أنظمة هاتف لاسلكية وأنظمة بث صوتية أمرا سهلا. وفي عام 1906م تمكن المهندس الأمريكي (Greenleaf Pickard) من اختراع كاشف جديد للإشارات الكهربائية بدلا من الكاشف المتماسك وهو الكاشف البلوري (crystal detector) وهو عبارة عن سلك معدني على شكل زنبرك يتم تثبيته بحيث يلامس رأسه بلورة من مادة شبه موصلة وهو يسمح بمرور التيار باتجاه واحد فقط وقد تبين فيما بعد أن هذا الكاشف يعمل على نفس مبدأ ثنائي شوتكي (Schottky diode). وفي عام 1912م تمكن المهندس والمخترع الأمريكي الشهير إدون أرمسترونج (Edwin Armstrong) من اختراع أحد أهم الطرق المستخدمة في نقل إشارات المعلومات الكهربائية وهو تعديل الاتساع (amplitude modulation) حيث اقترح طريقة مبتكرة لرفع كفاءة بث الأمواج الكهرومغناطيسية من الهوائيات من خلال تحميل الإشارة الكهربائية الصوتية على حامل راديوي بحيث يتم تعديل اتساع موجة الحامل تبعا لقيمة الإشارة الصوتية مع الحفاظ على ثبات تردد الحامل. ولم تقتصر فائدة اختراع تعديل الاتساع على رفع كفاءة البث من الهوائيات بل حقق إنجازا في غاية الأهمية لأنظمة الاتصالات وهو إمكانية بث أي عدد من الإشارات الصوتية على نفس قناة الاتصال دون أن تتداخل مع بعضها البعض شريطة أن يكون لكل منها حاملها الخاص. وبذلك

أصبح بالإمكان لأي عدد من المحطات أن تبث برامجها في نفس المنطقة أو المناطق المتجاورة دون الخوف من تداخل إشاراتها ويمكن للمستمع أن يستخدم جهاز استقبال واحد لاختيار أي من هذه المحطات من خلال تغيير قيمة مكثف متغير داخل جهاز الاستقبال.

وفي عام 1918م تم اختراع طريقة عالية الكفاءة لاستقبال الإشارات وهو مستقبل المزج الفائق (superheterodyne receiver) والذي يعتمد على استخدام مذبذب محلي (local oscillator) يتم مزج إشارته مع الإشارة المستقبلة لينتج إشارة جديدة بتردد يساوي الفرق بين تردد الإشارتين وتسمى هذه الإشارة بإشارة التردد الوسيط (intermediate frequency IF). ويتم تغذية إشارة التردد الوسيط إلى مضخمات ومرشحات يتم تصميمها لتضخيم وترشيح هذه الإشارة عند تردد يتم تثبيته عند قيمة معينة. وفي هذه الحالة تتم عملية توليف المستقبل (tuning) لاستقبال المحطات المختلفة من خلال تغيير تردد المذبذب المحلي فقط بينما كان يتم في السابق من خلال توليف جميع المضخمات والمرشحات وهي عملية بالغة الصعوبة. ونتيجة لاستخدام هذه الاختراعات العظيمة ومع تحسين حساسية أجهزة الاستقبال قام عدد من الهواة بإنشاء محطات

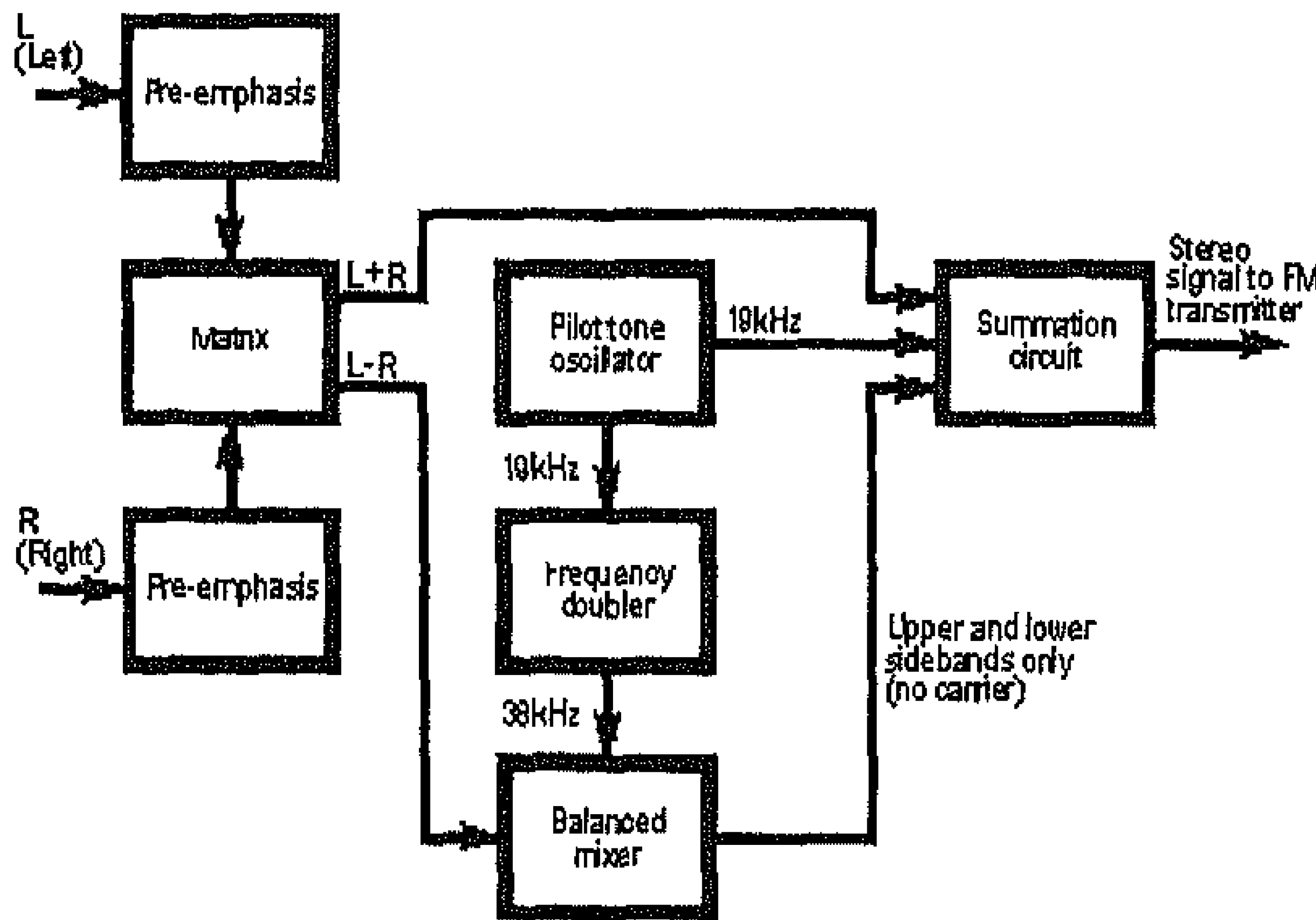


بث راديوية صغيرة غير رسمية بدأت بالانتشار السريع في مختلف الولايات الأمريكية وأوروبا وذلك بعد أن تزايد الطلب على أجهزة استقبال الراديو وتزايد عدد المستمعين لها. ونتيجة للاختيار غير المنظم للترددات من قبل محطات البث المختلفة بدأت مشاكل التداخل بينها بالظهور مما دعا الحكومة الأمريكية لإصدار أول قانون يقوم بتنظيم عمليات البث من خلال أخذ تصاريح لبناء محطات البث وتحديد الترددات المسموح بها في تلك المنطقة من قبل هيئة حكومية. وفي عام 1918م تم افتتاح أول محطة رسمية للبث الراديوي في أميركا ومن بعد ذلك بدأت محطات البث الرسمية بالانتشار السريع في أميركا وأوروبا وبقية دول العالم. وبحلول عام 1930م دخل الراديو إلى معظم المنازل في أميركا وأوروبا وكان حجمه بحجم جهاز التلفزيون بسبب استخدامه للصمامات الإلكترونية. وفي عام 1933م قام المهندس أرمسترونج سالف الذكر باختراع نوع آخر من التعديل وهو تعديل التردد (frequency modulation) والذي يعمل على العكس من طريقة تعديل الاتساع (amplitude) حيث تعمل إشارة الصوت على تغيير تردد الحامل الراديوي مع الإبقاء على اتساعه ثابتا. ويتميز هذا النوع من التعديل على سابقه بمقاومته العالية للضجيج مما يعني إشارة صوتية أكثر وضوحا ولكن يلزم مقابل هذه الميزة أن تكون ترددات الحاملات المختلفة أكثر تباعدا وذلك لأن طيف الترددات التي تحتله إشارة تعديل التردد يزيد بعشرات المرات عن مثيلتها في تعديل الاتساع.

بدأ البث الراديوي باستخدام تعديل الأتساع لتحميل الإشارات الصوتية على الحاملات الراديوية التي تقع تردداتها في نطاق الترددات المنخفضة والمتوسطة ولكن وبعد اكتشاف الموجات القصيرة في عام 1919م واكتشاف تقنية تعديل التردد في عام 1933م ظهر نوعان آخران من البث الراديوي وهما راديو الموجات القصيرة (short wave radio) وراديو تعديل التردد (FM radio). ومع اختراع الترانزستور في عام

1947م واستخدامه كبديل للصمام الإلكتروني تقلصت أحجام الراديوات بشكل كبير جدا لتصبح بحجم الكف أو أصغر من ذلك وزادت حساسيتها في التقاط الإشارات بسبب زيادة عدد مراحل التضخيم فيها دون زيادة تذكر في أحجامها. وأصبحت الراديوات بفضل الترانزستور لا تستهلك إلا قدر ضئيل من الطاقة الكهربائية بحيث يمكن لبطاريتين بحجم الإصبع أن تشغل الراديو لعدة أسابيع أو ربما أشهر. ومع ظهور تقنية الدوائر المتكاملة في الستينات حصل مزيد من التقليص في أحجام الراديوات بحيث أمكن دمج معظم مكونات الراديو في دائرة متكاملة واحدة (integrated circuit) لا تتجاوز أبعادها عدة سنتيمترات ولولا البطاريات والسماعة والهوائي لكان حجم الراديو بحجم علبة الكبريت أو أصغر من ذلك. ويوجد الآن ثلاثة أنواع من البث الراديوي فالنوع الأول هو راديو تعديل الاتساع أو الموجات المتوسطة (AM or MW radio) والذي يستخدم تعديل الاتساع وتقع ترددات بثه ضمن نطاق الترددات المتوسطة التي تمتد من 535 إلى 1605 كيلوهيرتز وبعرض نطاق (bandwidth) إما تسعة أو عشرة كيلوهيرتز لكل محطة راديوية وتنتشر هذه الترددات على شكل موجات سطحية (surface waves) لا يتجاوز مداها في الغالب الألف كيلومتر. أما النوع الثاني فهو راديو الموجات القصيرة (SW radio) والذي يستخدم تعديل الاتساع أيضا ويعمل على الترددات العالية التي تمتد من 3 إلى 30 ميغاهيرتز وبعرض نطاق كما في راديو الموجات المتوسطة. وتنتشر ترددات هذا النوع على شكل موجات سماوية (sky waves) قد يصل مداها لعدة آلاف من الكيلومترات ولكن هذا البث لا يمكن استقباله إلا في فترات زمنية محددة بسبب اعتماده على طبقات الأيونسفير التي تتأثر خصائصها بشكل كبير بموقع الشمس من الأرض.

وأما النوع الثالث فهو راديو تعديل التردد (FM radio) فيعمل في نطاق الترددات العالية جدا حيث تم تخصيص عرض النطاق الممتد من 88 إلى 108 ميغاهيرتز بعرض نطاق 200 كيلوهيرتز لكل محطة. ويتميز هذا النوع من البث بنقاوة الصوت المستقبل ويعود ذلك لسببين أولهما أن الإشارة الصوتية الكهربائية يتم إرسالها بكامل نطاقها الذي يمتد من 30 هيرتز حتى خمسة عشر كيلوهيرتز مقارنة بأربعة كيلوهيرتز في راديو تعديل الاتساع ولذلك تم استخدامه

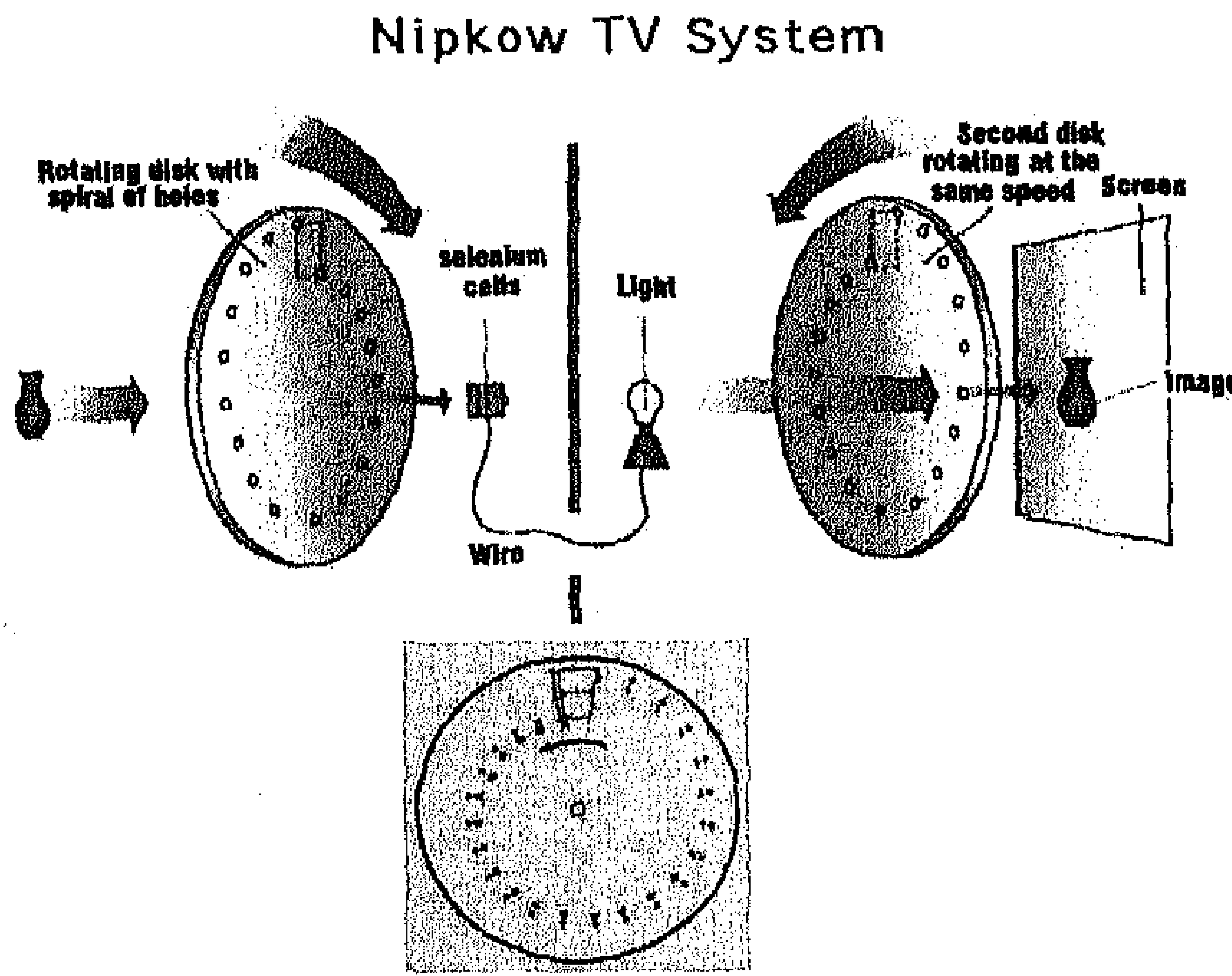


في نقل البرامج الغنائية والموسيقية. وثانيهما أن تعديل التردد له مقاومة عالية للضجيج الذي تتعرض له الإشارات الكهربائية عند انتقالها من المرسل إلى المستقبل. ولكن في المقابل يوجد عيبان لتعديل التردد أولهما أن الإشارة تحتل طيف ترددات يزيد بعشرين ضعف عن ما تحتله إشارة تعديل الاتساع وثانيهما أن مدى البث لا يتجاوز عشرات الكيلومترات بسبب انتشاره على شكل موجات فضائية (space waves) لا ينحني مسارها مع انحناء سطح الأرض كما في الموجات السطحية ولا تنعكس عن طبقات الأينوسفير كما في الموجات السماوية. وتستخدم غالبية محطات البث الحديثة ذات تعديل التردد تقنية الصوت المجسم (stereo sound) وفيها يتم إرسال إشارتين للصوت يتم أخذهما من مصدر الصوت باستخدام ميكروفونيين وعند المستقبل يتم استخدام سماعتين تغذى كل واحدة منهن بإحدى إشارتي الصوت فيحس المستمع وكأنه جالس أمام مصدر الصوت الأصلي. وتبث هذه المحطات أيضا خدمة ما يسمى نظام البيانات الراديوي (Radio

(Data System RDS) وفيها يتم إرسال معلومات مختلفة بطريقة رقمية تظهر على شاشة الراديو عن محطة البث المستلمة من حيث اسمها واسم البلد التي تبث منه ونوع البرامج التي تبثها المحطة وفيما إذا كانت المحطة تبث على ترددات أخرى يقوم الراديو بالتحول إليها تلقائيا حسب قوة الإشارة الصادرة منها وكذلك بعض الرسائل القصيرة. وعلى الرغم من أن الطيف الترددي المخصص لمحطات البث الراديوي بجميع أنواعه لا يتسع لأكثر من عدة مئات من المحطات ولكن من خلال إعادة استخدام الترددات (frequency reuse) في المحطات المتباعدة جغرافيا يمكن زيادة عدد محطات البث إلى مئات الآلاف حيث يوجد في أميركا اليوم ما يزيد عن عشرة آلاف محطة بث راديوي معظمها من نوع تعديل التردد. ومؤخرا بدأ استخدام الأقمار الصناعية لبث المحطات الإذاعية الرقمية ضمن عرض النطاق المخصص للقنوات التلفزيونية حيث يمكن تحميل عدة محطات إذاعية مع كل محطة تلفزيونية ويمكن الاستماع لها من خلال جهاز التلفزيون بتوليف تردد حامل الصوت في الإشارة التلفزيونية.

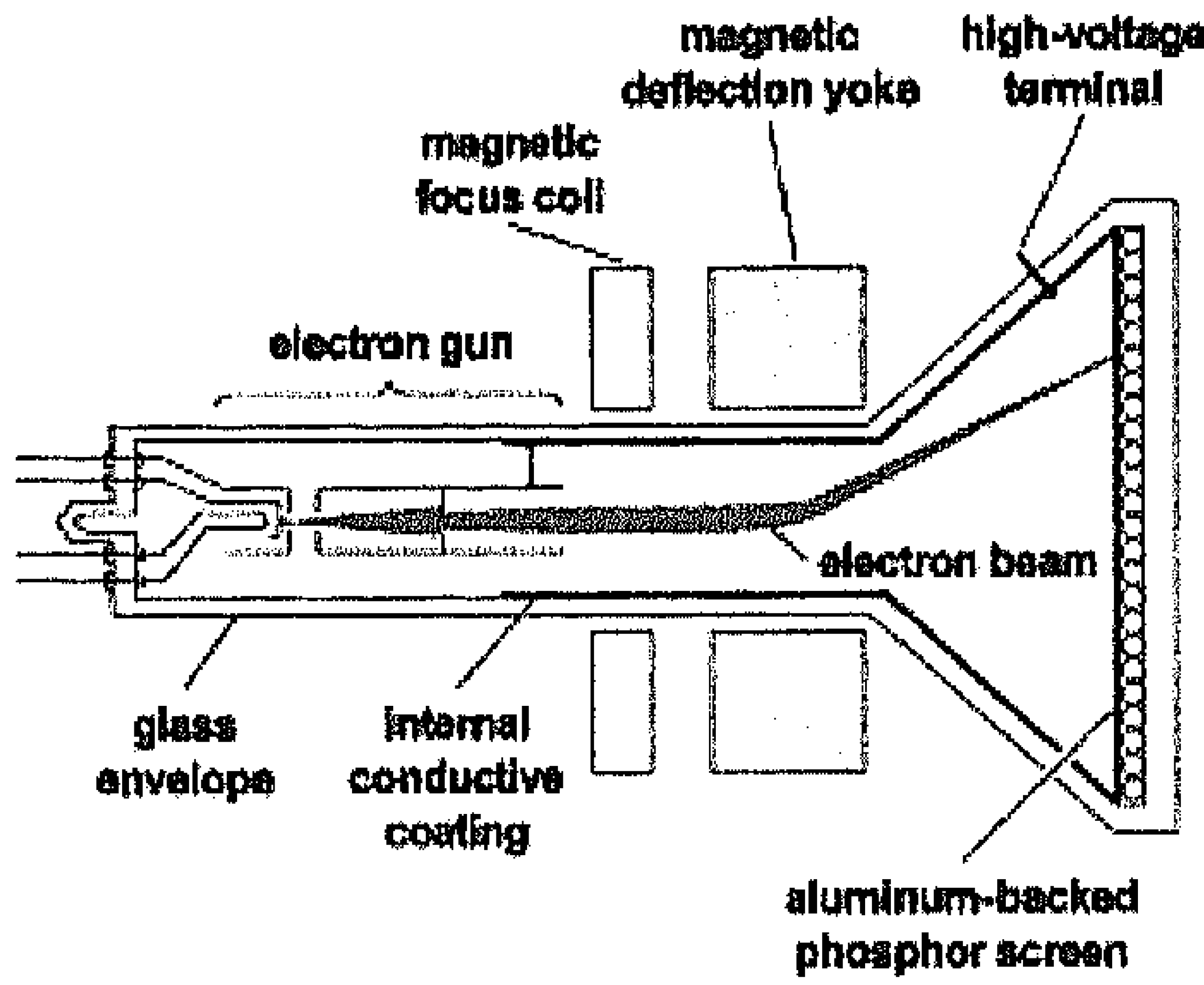
3-6 البث التلفزيوني (Television Broadcasting)

قام الأمريكي جورج كيري (George Carey) في عام 1875م بأول محاولة لنقل الصور باستخدام الكهرباء من خلال تسليط الضوء المنعكس عن الصورة على لوح مرصع بالخلايا الضوئية التي تقوم بتوليد تيارات كهربائية تتناسب مع شدة الضوء المنعكس ومن ثم يتم نقل هذه التيارات بالأسلاك إلى عدد مماثل من المصابيح الكهربائية المتراصة فتضيء بدرجات متفاوتة راسمة بذلك ظلال الصورة الأصلية. وفي عام 1884م تمكن الألماني بول نبكو (Paul Nipkow) من التخلص من هذا العدد الكبير من الخلايا والمصابيح والأسلاك المستخدمة في نظام كيري وذلك من خلال استخدام نظام ميكانيكي لمسح الصورة.

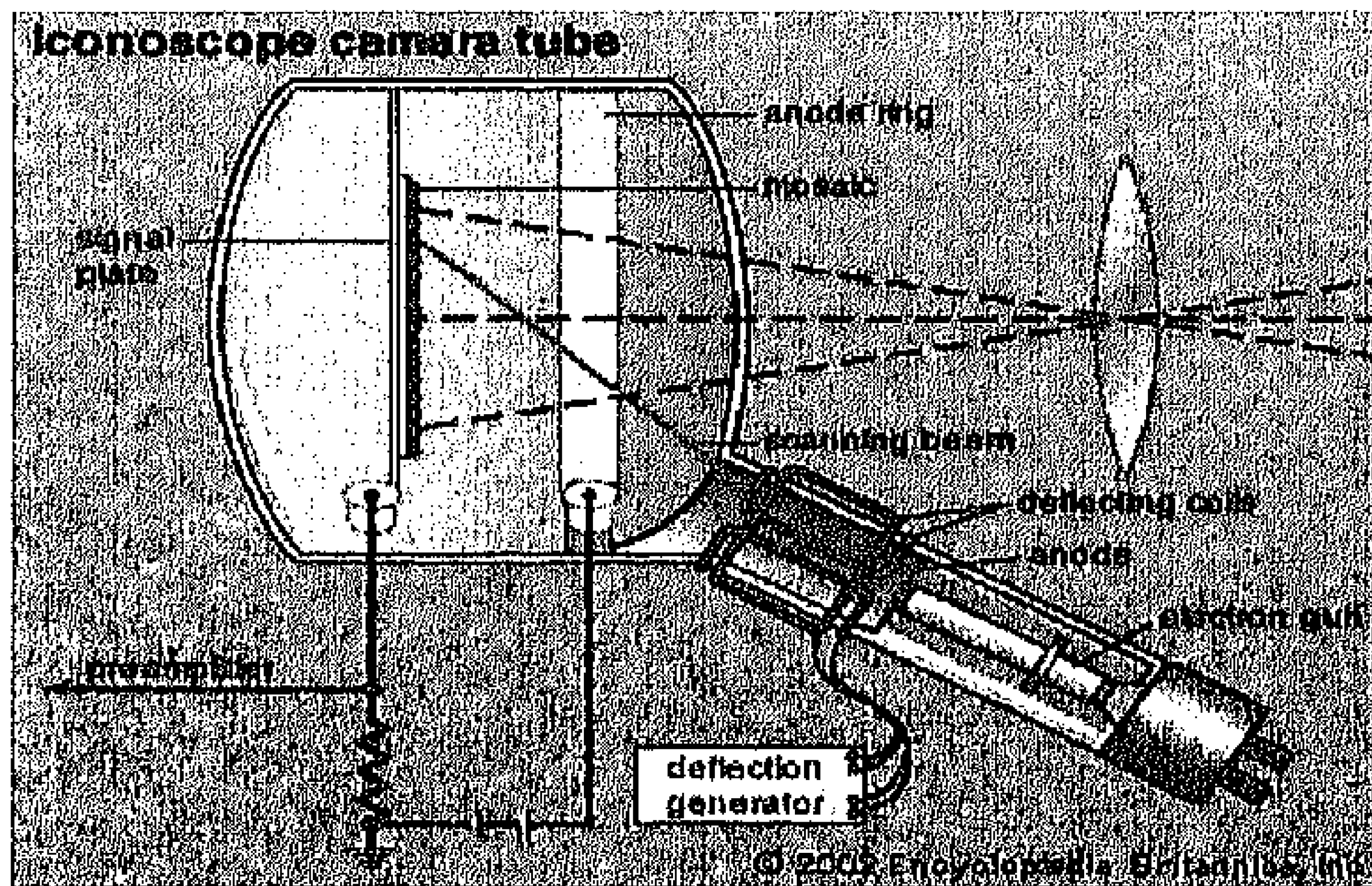


ويتكون هذا النظام من قرص مثقب يقوم عند تدويره بتمرير الضوء من خلال الثقوب إلى خلية ضوئية واحدة فتقوم بتحويله إلى تيار كهربائي يتم نقله إلى مصباح واحد مثبت أمام قرص مثقب آخر مشابه لقرص المرسل فيرسم على سطحه عند تدويره ظلال الصورة الأصلية. إن إعادة تركيب الصورة على القرص المستقبل يتطلب وجود وسيلة تضمن تزامن دوران القرصين بحيث يسقط الضوء على جزء الصورة المعني في الوقت المناسب وإلا تبعثرت أجزاء الصورة على سطح القرص بشكل عشوائي وتضيع معالمها. ويعتبر شرط التزامن (synchronization) وعملية المسح الميكانيكية (scanning) والتي تم استبدالها لاحقا بالمسح الإلكتروني هما الأساسان اللذان يقوم عليهما عمل جميع الأنظمة التلفزيونية الحديثة.

أما التطور الأكثر أهمية في تاريخ التلفزيون فهو اختراع أنبوب الأشعة المهبطية (cathode ray tube (CRT) في عام 1897م على يد الفيزيائي الألماني كارل براون (Karl Braun) وهو أنبوب زجاجي (glass envelope) مفرغ من الهواء ضيق عند إحدى طرفيه ومتسع في الطرف الآخر ويوجد في داخل طرفه الضيق قاذفة إلكترونية (electron gun) تولد شعاع إلكتروني دقيق موجه إلى طرف الأنبوب المتسع الذي يتم طلاءه بطبقة فوسفورية تطلق ضوء أبيض عند اصطدام الإلكترونات بحبيباتها. وتتم عملية المسح الإلكتروني في أنبوب الأشعة المهبطية من خلال تسليط مجالات مغناطيسية أو كهربائية على الشعاع الإلكتروني فينحرف عن مساره المستقيم إلى اليمين أو اليسار أو الأعلى أو الأسفل بمقدار يتناسب مع قيمة الجهد أو التيار الذي يولد هذه المجالات. ومن خلال التحكم كهربائيا بمقدار المجالات المسلطة يمكن جعل الشعاع الإلكتروني يمسح جميع الحبيبات الفوسفورية الموجودة على سطح الشاشة التي ستضيء بكاملها عند اصطدام الإلكترونات بها شريطة أن تتم عملية المسح بشكل سريع بحيث يصعب على العين متابعتها. أما معالم الصورة فيمكن إظهارها من خلال التحكم بشدة الشعاع الإلكتروني فكلما زادت شدته كلما زادت شدة الضوء المنبعث من الحبيبات الفوسفورية. ويتم التحكم بشدة الشعاع الإلكتروني من خلال تسليط جهد كهربائي على مصعد (Anode) يوضع في مسار الشعاع الإلكتروني. لقد لعب أنبوب الأشعة المهبطية دورا مهما وبارزا في كثير من التطبيقات التي ما كان لها أن تظهر قبل ظهوره فقد تم استخدامه كشاشة تلفزيونية لإظهار الصور في عام 1925م وككاميرة تلفزيونية في عام 1929م وكشاشة للرادار في بداية الأربعينات وكشاشة للحاسوب في الخمسينات إلى جانب استخدامه المهم في أجهزة الفحص الكهربائية كما في راسمات الذبذبات (oscilloscopes) ومحللات الطيف (spectrum analyzers) ومحللات المنطق الرقمي (digital logic analyzers).

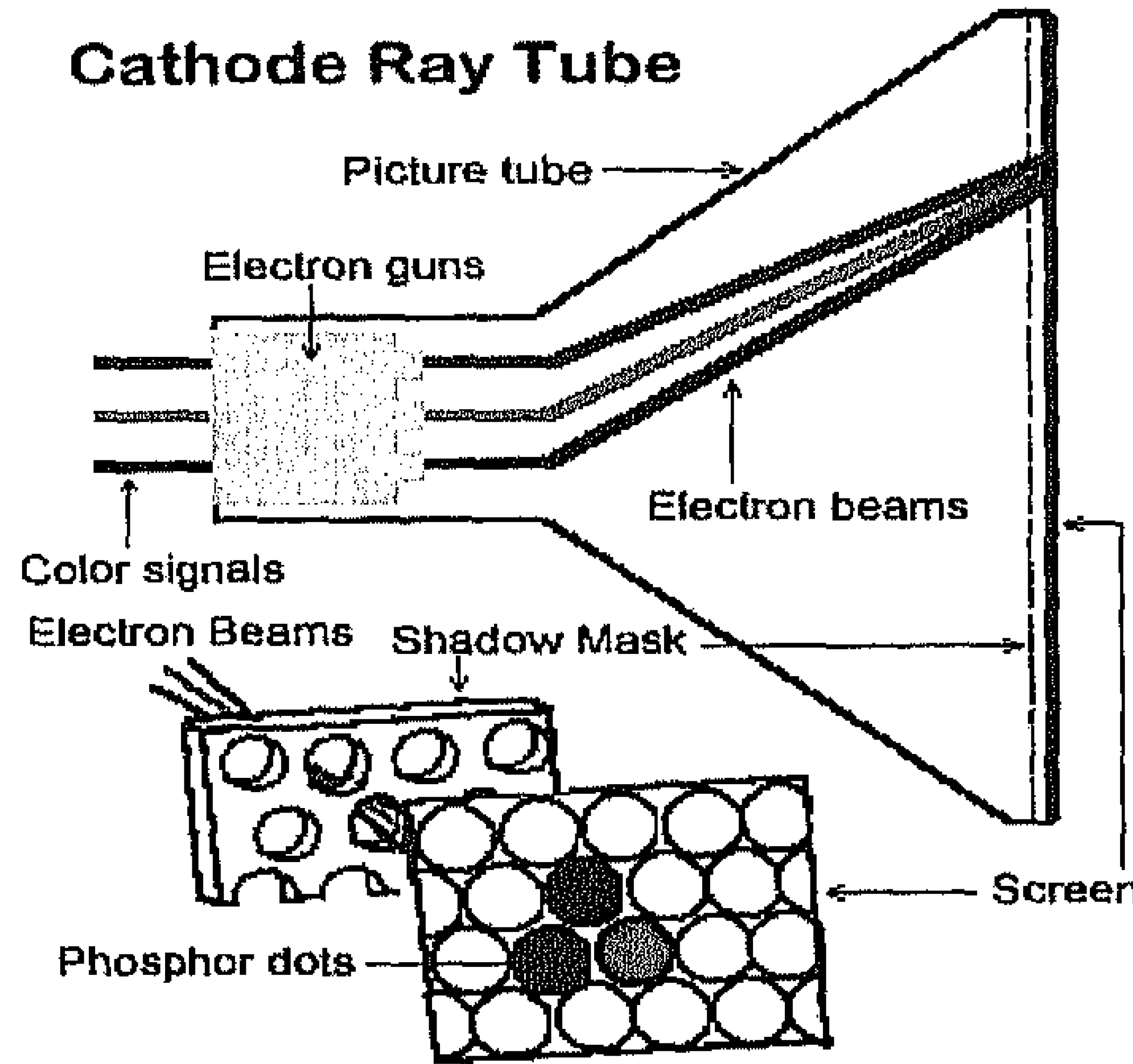


وفي عام 1929م تمكن المخترع الروسي المولد والأمريكي المنشأ فالدمير زوريكسن (Vladimir Zworykin) من استخدام أنبوب الأشعة المهبطية لبناء الكاميرة التلفزيونية (TV camera). ويرتكز عمل الكاميرة التلفزيونية كما هو الحال مع الشاشة التلفزيونية على مبدأ بسيط يعمل على خداع العين البشرية حيث يتم عرض مجموعة من الصور المتلاحقة للمشهد المراد نقله بمعدل يزيد عن 16 صورة في الثانية فيخيل للعين أن هذا المشهد متحرك. ويخيل لها كذلك عند النظر لنقطتين مضاءتين ومتجاورتين على بعد مسافة معينة أنهما نقطة واحدة وبذلك تبدو نقاط الصورة متصلة ببعضها على رغم وجود الفراغات بينها. ولهذا فإن الكميرات التلفزيونية تقوم بالتقاط 30 صورة في الثانية في النظام الأمريكي و25 صورة في الثانية في النظام الأوروبي ومن ثم يتم تحويل شدة إضاءة



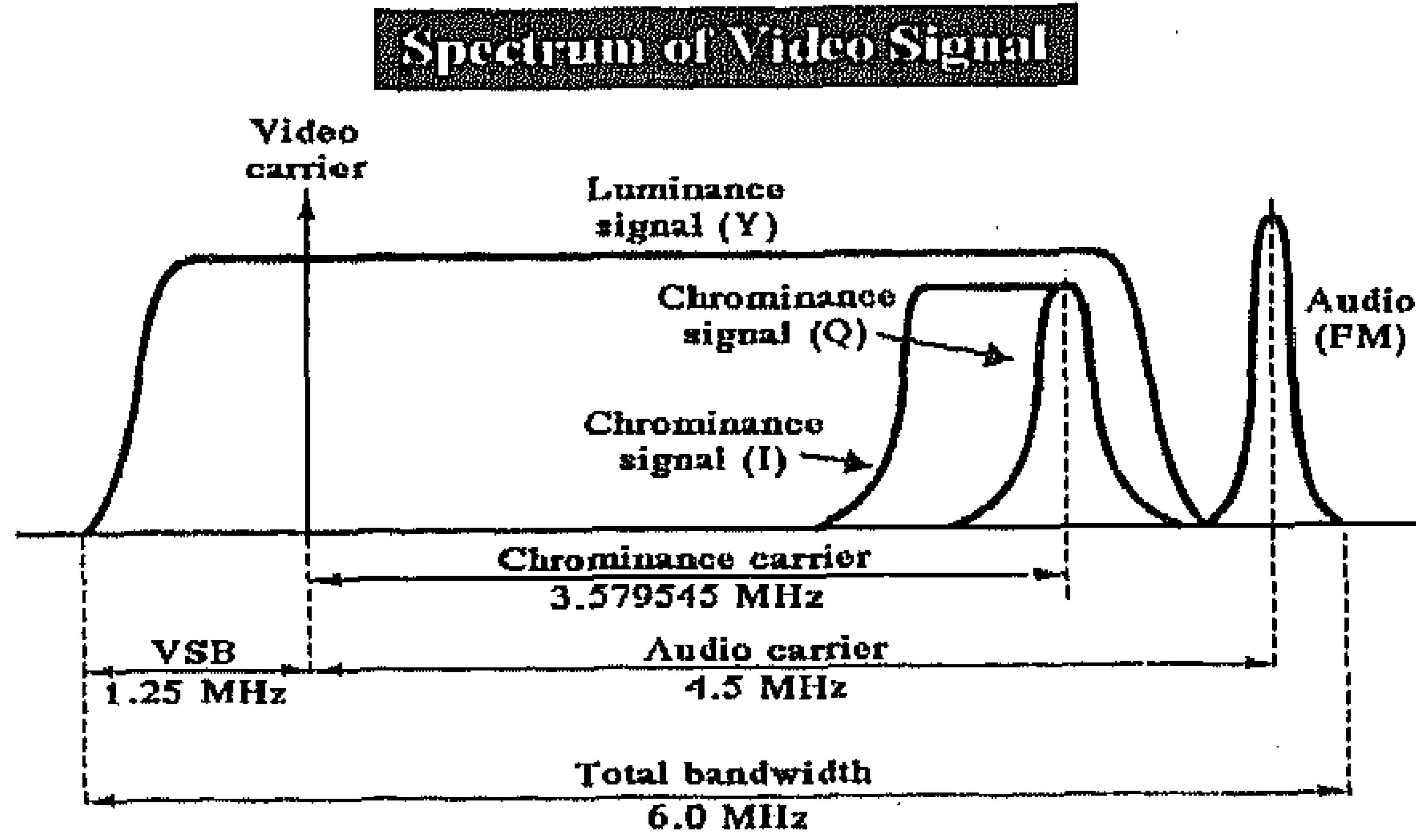
النقاط الموجودة على كل صورة إلى إشارة كهربائية من خلال عملية المسح الإلكترونية. إن اختيار هذه الأرقام لعدد الصور في الثانية لم يأتي عبثا فالرقم 30 في النظام الأمريكي هو نصف قيمة التردد الذي تعمل عليه الشبكة الكهربائية الأمريكية وهو 60 هيرتز وكذلك هو الحال مع النظام الأوروبي الذي تعمل شبكته الكهربائية على تردد 50 هيرتز. فقد وجد المهندسون وهم يطورون أنظمة التلفزيون أن مشاهدة التلفزيون بوجود مصابيح النيون والتي تومض بمعدل يساوي مقدار تردد الجهد الذي تعمل عليه يكون أفضل ما يكون عندما يكون عدد الصور يساوي نصف التردد.

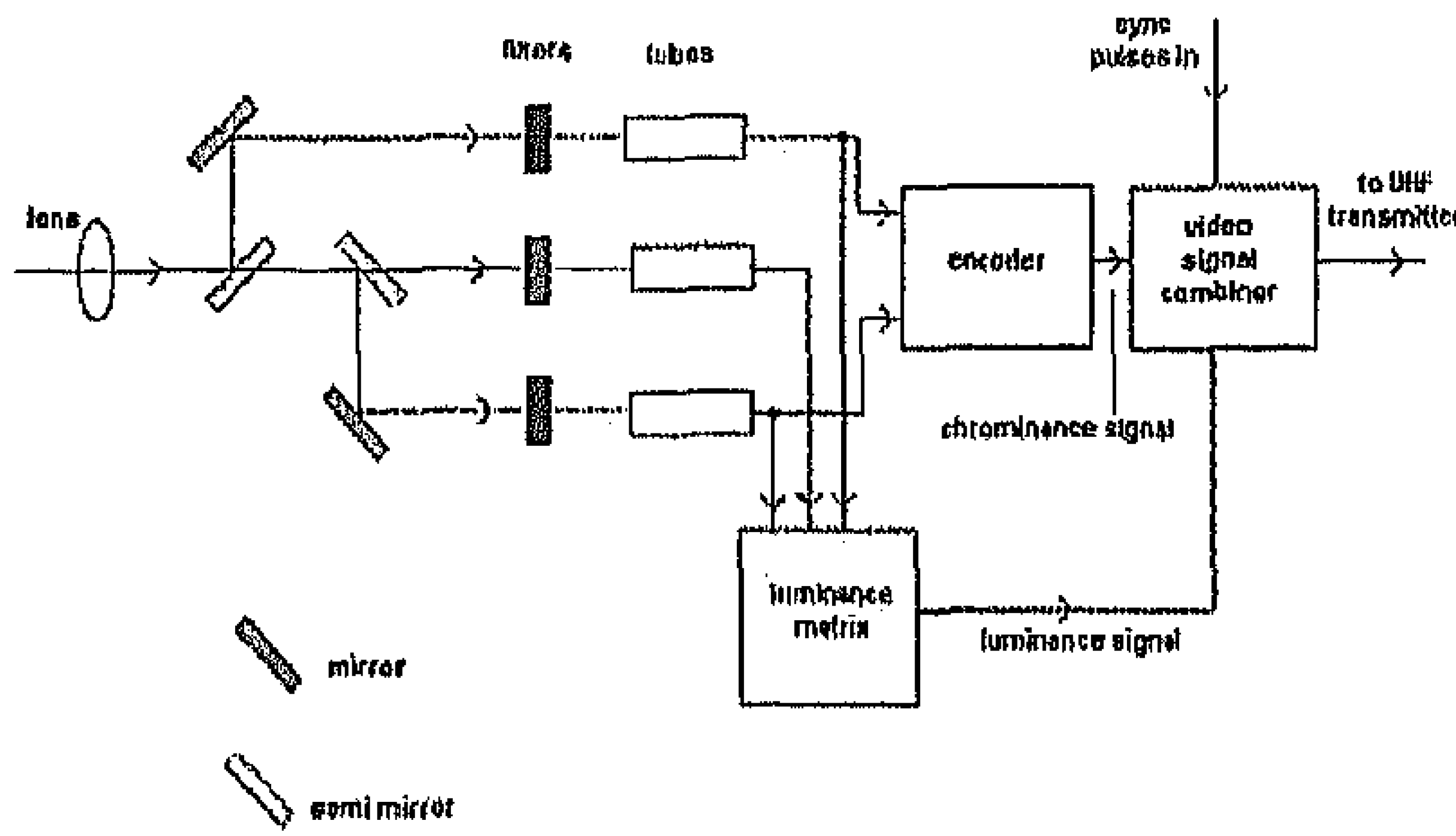
وتتم عملية المسح من خلال تمرير الشعاع الإلكتروني على السطح المعدني الذي ترسم عليه الصورة المراد مسحها. ويتم تحريك الشعاع الإلكتروني على شكل خطوط مستقيمة بحيث تمسح هذه الخطوط جميع السطح الذي تظهر عليه الصورة وكلما زاد عدد الخطوط في الصورة كلما زادت الدقة (Resolution) التي تظهر فيها الصورة. وقد تم اختيار عدد الخطوط في النظام الأمريكي والياباني 525 خط في الصورة بينما يبلغ العدد في النظام الأوروبي 625 خط في الصورة. ويوجد في الكميرات الملونة ثلاث مرشحات ضوئية تقوم بتحليل الصورة إلى ثلاث صور تمثل محتويات الصورة الأصلية من اللون الأحمر والأخضر والأزرق ويتم مسح هذه الصور لتحويلها إلى ثلاث إشارات كهربائية يتم تحويلها إلى إشارة كهربائية مركبة واحدة باستخدام ما يسمى بتعاقب التقسيم الترددي (Frequency Division Multiplexing). أما جهاز التلفزيون الملون فيتكون من جهاز استقبال يقوم باستخلاص إشارات اللون الثلاث من الإشارة الكهربائية المركبة ومن أنبوب أشعة مهبطية يتكون من ثلاث قاذفات إلكترونية ومن شاشة مغطاة بعدد كبير جدا من الحبيبات الفوسفورية المرتبة على شكل مجموعات يتألف كل منها من ثلاث حبيبات تشع الألوان الأساسية الثلاث عند قذفها بالإلكترونات. ولتبيان مقدار الدقة البالغة التي تلزم لتصنيع التلفزيون الملون فإنه يوجد على سطح شاشته ما يزيد عن مليون ونصف مليون حبيبة فسفورية ملونة بواقع نصف مليون حبيبة لكل لون من الألوان الثلاث مرتبة على شكل مجموعات مكونة من ثلاث حبيبات. وعند تسليط إشارات اللون الثلاث على مهابط القاذفات الإلكترونية الثلاث تبدأ شدة الأشعة الإلكترونية المنبعثة من المهابط بالتغيير تبعا لقيم الجهود الكهربائية لإشارات اللون الثلاث. ولكي نضمن ظهور اللون الأصلي على الشاشة يجب أن يصيب كل شعاع من الأشعة الإلكترونية الحبيبة الفسفورية التي تخصه بدقة بالغة بحيث تبدو كل مجموعة فسفورية للعين كنقطة واحدة وبلون واحد هو اللون الناتج عن مزج الألوان الأساسية الثلاثة.



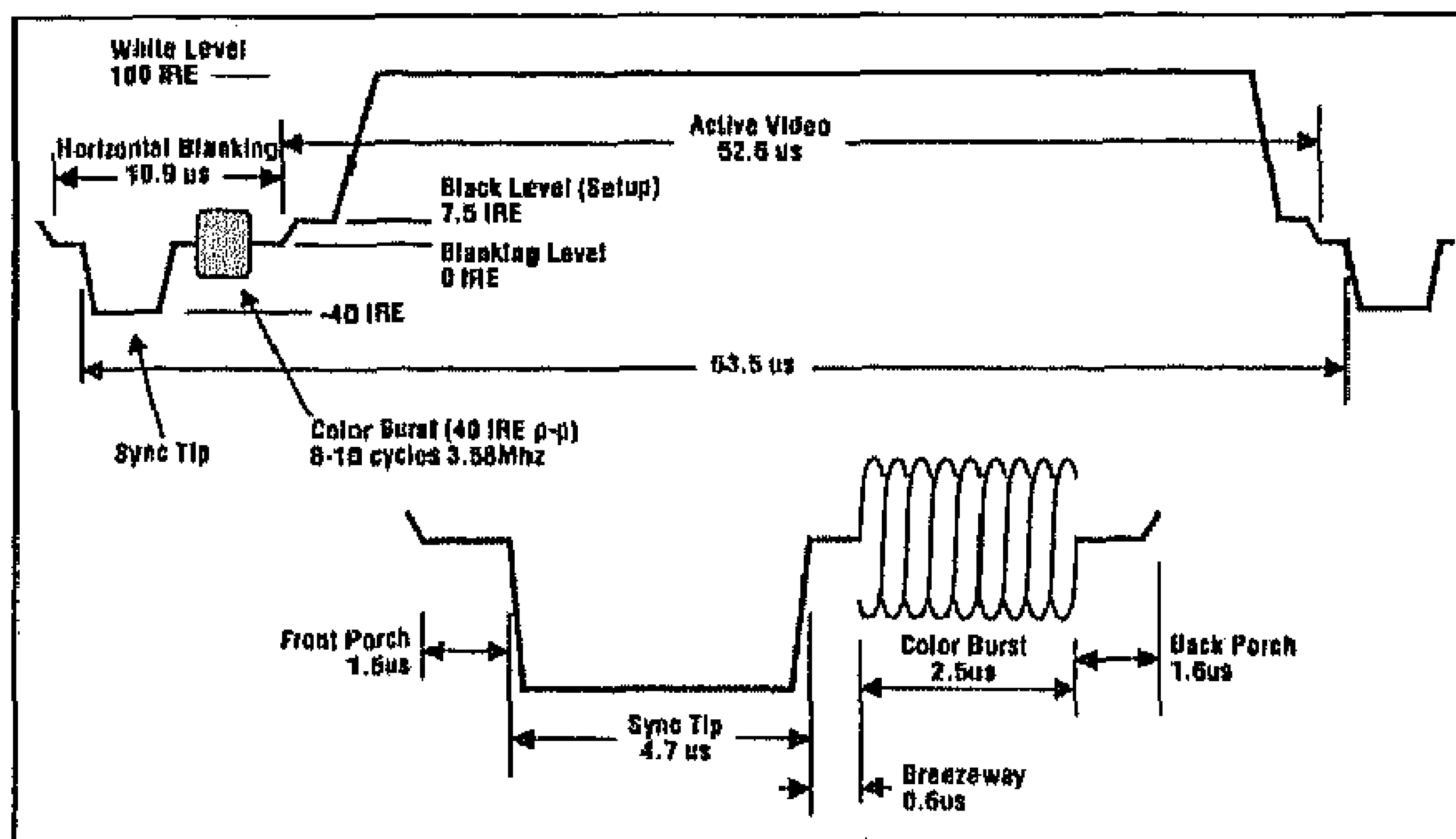
ومع استخدام أنبوب الأشعة المهبطية ككميرة تلفزيونية تقوم بتحويل شدة إضاءة الصورة إلى إشارة كهربائية وكشاشة تلفزيونية تقوم بتحويل الإشارة الكهربائية إلى صورة أصبح بناء نظام بث تلفزيوني في متناول اليد. حيث قامت ألمانيا بأول بث تلفزيوني غير ملون في عام 1935م تبعتها فرنسا في نفس العام بريطانيا في عام 1936م والولايات المتحدة الأمريكية في عام 1939م. ومع بدء الحرب العالمية الثانية في عام 1939م تقلصت الكمية المنتجة من التلفزيونات في الدول المتحاربة بعد أن قامت بتحويل مصانعها

لإنتاج الأجهزة الكهربائية اللازمة للأغراض الحربية كأجهزة الاتصالات والرادارات. وقد أفاد هذا الإجراء بشكل غير مباشر مصممي أنظمة التلفزيون بشكل كبير جدا حيث ساعدت الأبحاث والتجارب العلمية التي أجريت للأغراض العسكرية على تطوير كثير من المكونات الإلكترونية التي تم استخدامها فيما بعد في أجهزة إرسال واستقبال الإشارات التلفزيونية. ومع انتهاء الحرب عاودت المصانع في إنتاج التلفزيونات غير الملونة وازداد الطلب عليها في مختلف أنحاء العالم حتى وصل عدد أجهزة الاستقبال التلفزيونية في أميركا وحدها إلى 5 ملايين جهاز. وقد انصبت جهود المهندسين بعد الحرب العالمية الثانية على تطوير نظام البث التلفزيوني الملون إلا أن القيود التي فرضت عليهم من قبل هيئات تنظيم قطاع الاتصالات زاد من صعوبة مهمتهم. وكان أبرز هذه القيود ضرورة أن تحتل الإشارة التلفزيونية الملونة نفس عرض النطاق المخصص للإشارة التلفزيونية غير الملونة والبالغ ستة ميغاهيرتز في حين أنها تحتاج فعليا لثلاثة أضعاف ذلك. أما القيد الثاني فهو ضرورة وجود توافق بين أجهزة الاستقبال والإرسال في النظامين بحيث يمكن لمالكي التلفزيونات غير الملونة استقبال برامج محطات البث الملونة ومالكي التلفزيونات الملونة استقبال برامج محطات البث غير الملونة. وقد تم التغلب على جميع هذه العقبات باستخدام حلول مختلفة مما أدى إلى ظهور أنظمة بث تلفزيونية مختلفة وهي النظام الأمريكي والنظام الأوروبي والنظام الياباني.

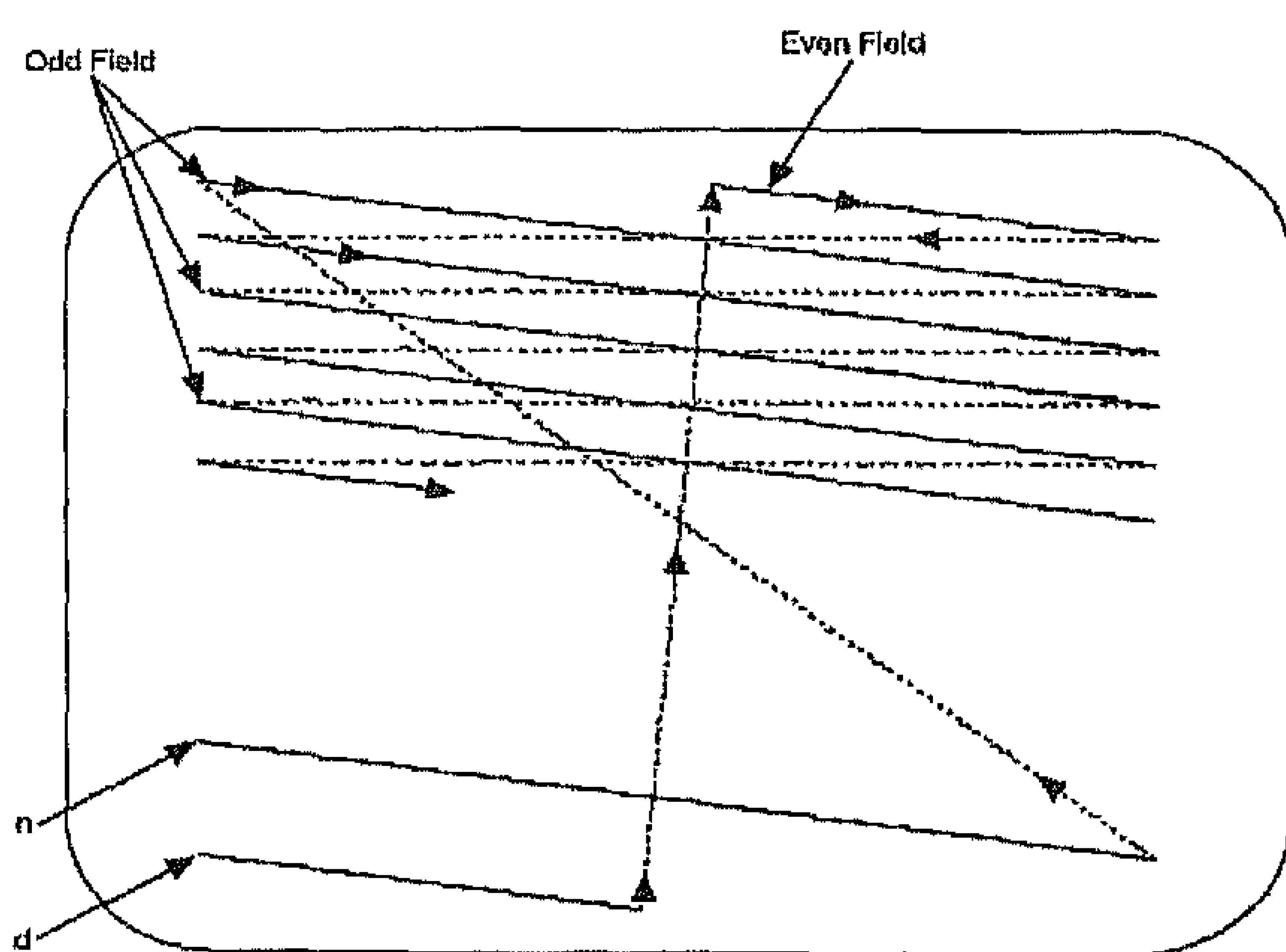




وتتكون الإشارة التلفزيونية الملونة المركبة (composite vedio signal) من أربع إشارات فرعية وهي إشارات الصورة الثلاث (vedio signals) وإشارة الصوت (audio signal). ولحل مشكلة التوافق بين أنظمة التلفزيون الملونة وغير الملونة تم تحويل إشارات اللون الثلاث الأساسية وهي الحمراء والخضراء والزرقاء (RGB signals) إلى ثلاثة إشارات



جديدة وهي إشارة السطوع (Luminance signal Y) والتي تستخدم في إظهار الصورة في التلفزيونات غير الملونة وإشارتي اللون ((Chrominance sgnals (I&Q)) والتي تستخدم مع إشارة السطوع في إظهار الصورة في التلفزيونات الملونة ولكن بعد تحويلها في المستقبل إلى إشارات اللون الأساسية الثلاث. ويتم دمج هذه الإشارات الأربع في إشارة أساسية مركبة (composite baseband signal) باستخدام تقنية تعاقب التقسيم الترددي ((Frequency Division Multiplexing(FDM)) ضمن نفس النطاق التي كانت تحتله الإشارة غير الملونة والبالغ عرضه ستة ميغاهيرتز. وفي هذه التقنية يتم تحميل إشارتي اللون على حامل فرعي يسمى حامل اللون (chrominance carrier) من خلال استخدام تعديل الاتساع المتعامد (Quadrature Amplitude Modulation (QAM)) بينما يتم تحميل إشارة الصوت على حامل خاص به (Audio carrier) باستخدام تعديل التردد(Frequency Modulation FM) . وأخيرا يتم تحميل الإشارة المركبة على حامل الصورة الرئيسي (main vedio carrier) باستخدام نوع خاص من التعديل يسمى (Vestigial Side Band (VSB) modulation) حيث يتم إرسال الطيف الجانبي العلوي (upper side band) من طيف الإشارة بكاملة وجزء صغير من الطيف الجانبي السفلى (lower side band) وذلك لتوفير النطاق التي تحتله الإشارة التلفزيونية على قناة الإرسال (transmission channel). وتحتوي الإشارة المركبة إلى جانب الإشارات الأربعة ثلاث إشارات تحكم أخرى بالغة الأهمية وهي إشارة التزامن (synchronization) وهي التي تتحكم بعملية مسح الصورة على شاشة التلفزيون لتتطابق مع مسح الصورة في الكميرة التلفزيونية وهي عبارة عن نبضة (sync pulse) لها مستوى جهد محدد ليتسنى استرجاه هذه النبضة في المستقبل. أما إشارة التحكم الثانية فهي إشارة الإطفاء (blanking level) وهي عبارة عن مستوى جهد محدد يعمل على إطفاء الأشعة الإلكترونية أثناء رجوعه من اليمين إلى اليسار خلال عملية المسح لكي لا يترك أثرا على الشاشة خلال هذه الفترة. أما الإشارة الثالثة فهي عبارة عن نبضة راديوية تسمى دفقة اللون (color burst) تستخدم لضبط تردد حامل اللون في المستقبل والذي يلزم أن يكون له نفس التردد ونفس الطور لحامل اللون في المرسل لكي يتم فصل إشارتي اللون عن بعضهما من الحامل المشترك .

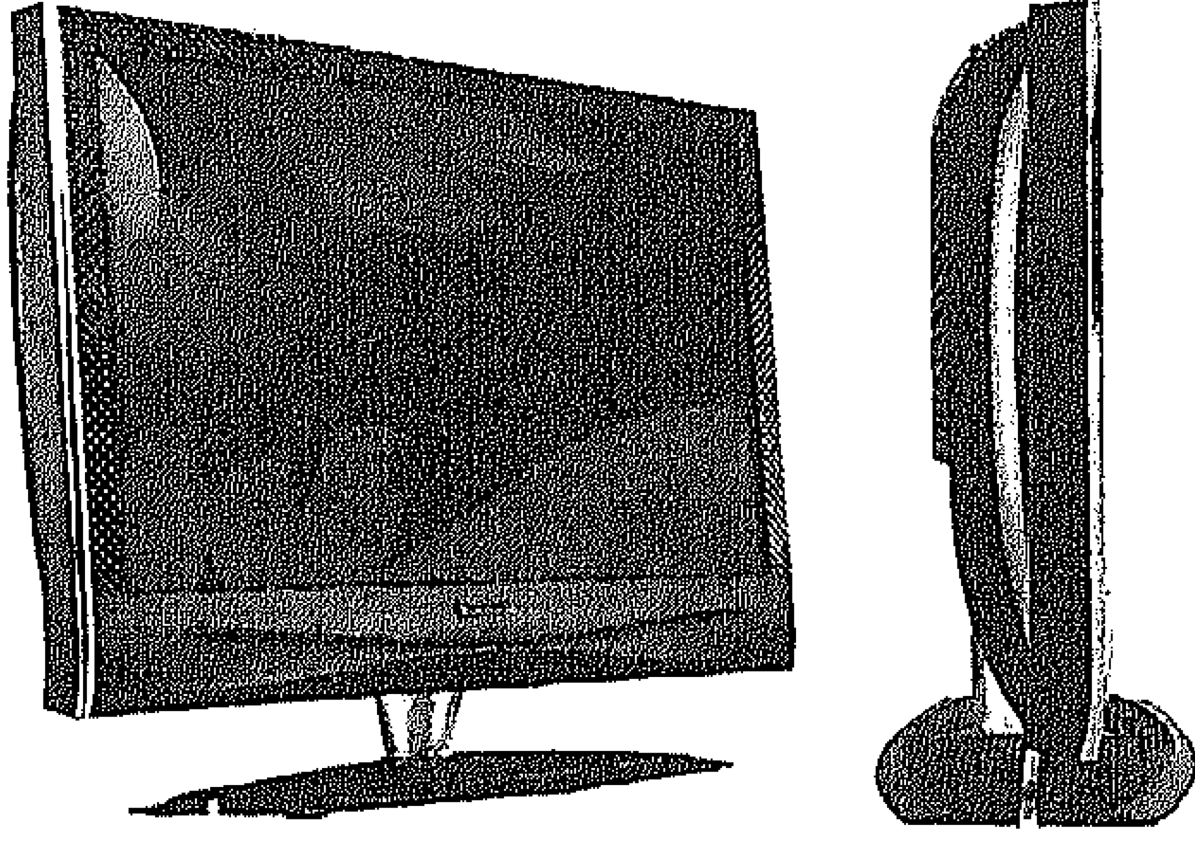


ويوجد في العالم ثلاثة أنظمة للبث التلفزيوني وهي النظام الأمريكي (NTSC) ويبلغ عدد الصور المعروضة في الثانية 30 صورة وعدد الخطوط في الصورة 525 خط والنظام الأوروبي (PAL &Secam) ويبلغ عدد الصور المعروضة في الثانية 25 صورة في الثانية وعدد الخطوط في الصورة 625 خط والنظام الياباني (NTSC-J) ويبلغ عدد الصور المعروضة في الثانية 30 صورة في الثانية وعدد الخطوط في الصورة 525 خط وهو كالنظام الأمريكي مع اختلاف بسيط في الإشارة المركبة. وفي جميع هذه الأنظمة لا يتم مسح خطوط الصورة على الشاشة دفعة واحدة بل يتم أولا مسح الخطوط الفردية ومن ثم يتم مسح الخطوط الزوجية بما يسمى تقنية المسح المتداخل (Interlaced Scanning Technique). وفي هذه

التقنية يتم تقسيم الصورة الأصلية إلى صورتين يحتوي كل منهما على نصف عدد الخطوط في الصورة الأصلية ويطلق اسم المجال (field) على كل منهما. وبهذا فإن عدد المجالات المعروضة في الثانية يبلغ 60 مجالا في النظام الأمريكي والياباني و 50 مجالا في النظام الأوروبي وهو ضعف عدد الصور المعروضة في الثانية. لقد كان الدافع وراء استخدام هذه التقنية هو أنه عند وصول الشعاع الإلكتروني الماسح إلى أسفل الصورة فإن تفصيلات الصورة في أعلى الشاشة تبدأ بالخفوت بسبب تلاشي الضوء المنبعث من الحبيبات الفوسفورية بعد أن تم إثارته بهذا الشعاع في وقت سابق والعكس صحيح عند وصول الشعاع إلى أعلى الصورة مما يؤدي إلى ظهور ظاهرة التلألأ (flicker) المزعجة لعين المشاهد. ولكن باستخدام تقنية المسح المتداخل فإن الشعاع الإلكتروني يعود لمسح نفس المنطقة على الشاشة في زمن يساوي نصف الزمن في حالة عدم استخدام هذه التقنية مما لا يسمح بخفوت ضوء تلك المنطقة عن الحد الذي يؤدي إلى ظاهرة التلألأ. وحتى مع استخدام هذه التقنية فإن ظاهرة التلألأ لا تختفي تماما وهي أعلى ما تكون في النظام الأوروبي بسبب أن عدد المجالات في الثانية هو 50 مجال وهو أقل منه في النظام الأمريكي والياباني والبالغ 60 مجالا. وقد أثبتت الدراسات أن هذه الظاهرة تختفي تماما إذا ما زاد عدد المجالات عن 70 مجالا في الثانية ويسمى عدد المجالات في الثانية بمعدل الإنعاش (Refresh rate) وقد استخدم المهندسون تقنيات مختلفة لزيادة معدل الإنعاش في التلفزيونات وشاشات الحواسيب.

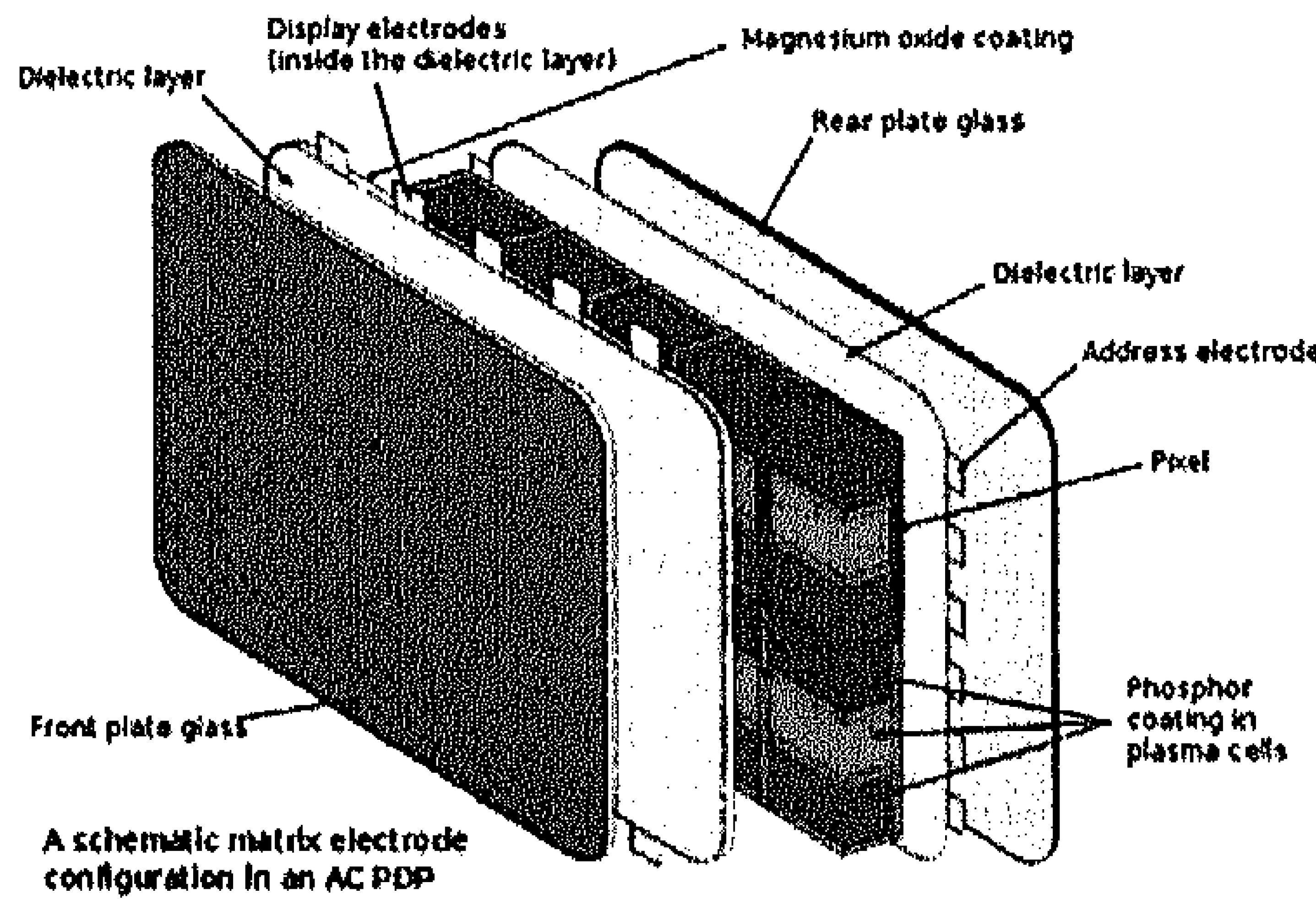
وبسبب تعقيد الدوائر الإلكترونية في التلفزيون الملون فقد كان من الصعب بناؤه بحجم مناسب باستخدام الصمامات الإلكترونية (electronic valve) بسبب حجمها الكبير واستهلاكها العالي للطاقة الكهربائية. ومع اختراع الترانزستور في عام 1947م والذي يتميز بصغر حجمه واستهلاكه القليل للطاقة أصبح بمقدور المهندسين تصنيع التلفزيونات الملونة بالمواصفات المطلوبة وكذلك أدى اختراع الدوائر المتكاملة (Integrated Circuits) إلى مزيد من التقليص في المساحة التي تحتلها الدوائر الإلكترونية في داخل التلفزيون الملون. وعليه فقد بدأ البث التلفزيوني الملون في الولايات المتحدة في عام 1954م بينما تأخر إلى منتصف الستينات في الدول الأوروبية وبداية السبعينات في بقية دول العالم. ويتكون نظام البث التلفزيوني الأرضي من محطة بث أرضية تبث في جميع الاتجاهات من خلال هوائي منصوب على برج مرتفع ليصل البث إلى أقصى مدى ممكن ويتم البث باستخدام الترددات العالية والتي تنتشر كموجات فضائية لا تزيد فيها مسافة التغطية في الغالب عن عدة عشرات من الكيلومترات. وبما أن عرض نطاق الإشارة التلفزيونية يبلغ ستة ميغاهيرتز فإنه يلزمها حامل عالي التردد يبلغ تقريبا عشرة أضعاف عرض النطاق ليسهل بثها واستقبالها بكفاءة عالية. ولذا فقد تم تخصيص بعض أجزاء نطاقي الترددات العالية جدا (VHF) وفوق العالية UHF) لأغراض البث التلفزيوني لتستوعب 83 قناة تلفزيونية ابتداء من 54 ميغاهيرتز ولكن تم مؤخرا تقليصها إلى 69 قناة وذلك بإلغاء القنوات ذوات الأرقام من 70 إلى 83 لإتاحة المجال لاستخدام أنظمة الهواتف الخلوية.

شاشات العرض (Display Screens)

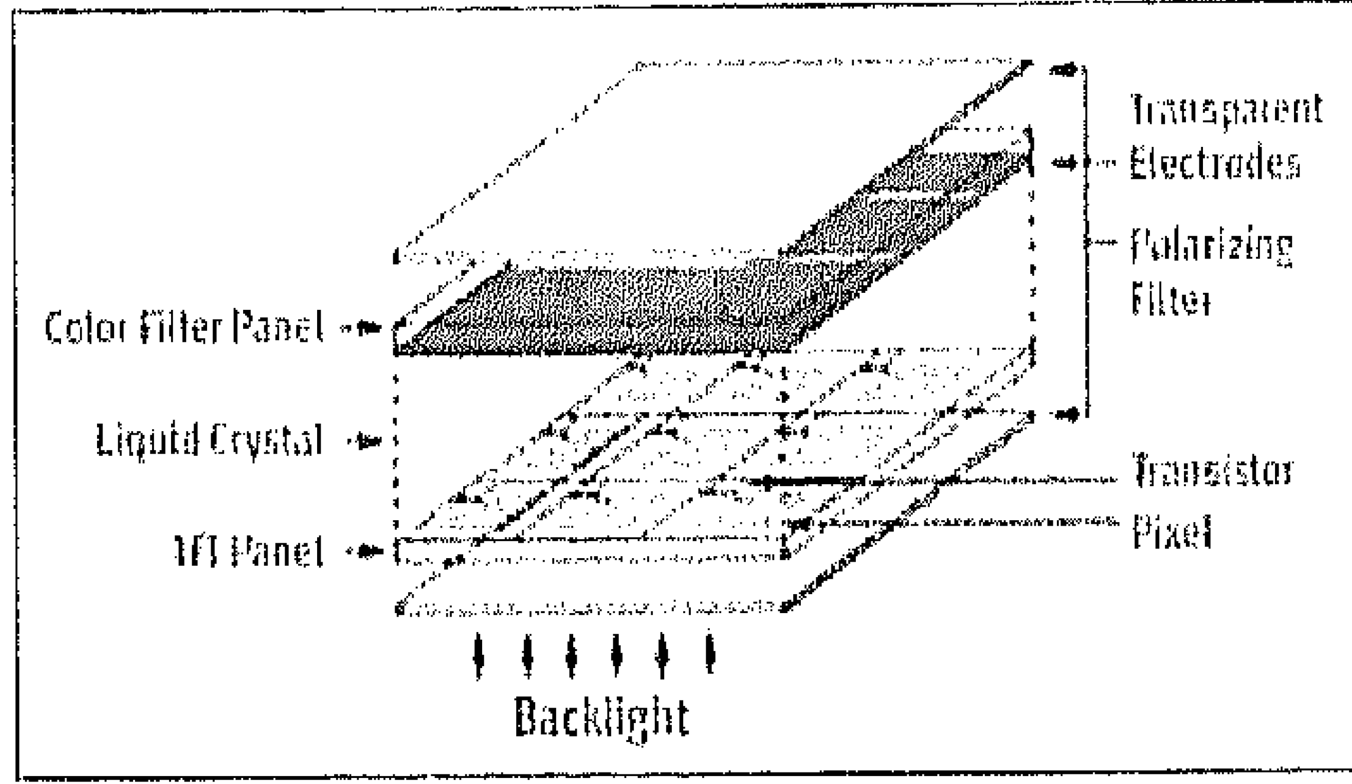


احتفظ أنبوب الأشعة المهبطية (CRT) منذ اختراعه في عام 1897م بمكانته كشاشة عرض في كثير من التطبيقات كالتلفزيون والحاسوب والرادار وأجهزة القياس كراسم الذبذبات ولا زال يستخدم في هذه التطبيقات بنسب عالية جدا حيث بدأت أنواع أخرى من الشاشات تستخدم في بعض التطبيقات كما في شاشات الحواسيب والتلفزيونات. إن من أكبر سيئات هذا النوع من الشاشات هو كبر حجمها وثقل وزنها فعلى سبيل المثال فإن تلفزيون بشاشة تبلغ 29 بوصة يحتاج لشخصين لحمله هذا ولهذا السبب فإن أكبر حجم لهذه الشاشات لا يتجاوز الأربعين بوصة أي ما يعادل المتر وهي المسافة بين زاويتين متقابلتين من زواياه الأربع. ومن سيئاتها كذلك استهلاكها العالي نسبيا للطاقة الكهربائية وتعمل على جهد قد يصل لعشرات الآلاف من الفولتات وكذلك تولد أشعة إكس نتيجة لاصطدام حزمة الإلكترونات العالية الطاقة بالسطح الداخلي للشاشة مما يستدعي استخدام زجاج مطعم بالرصاص للتخفيف من هذه الأشعة الضارة بجسم الإنسان. وفي المقابل تتميز هذه الشاشات بوضوح صورتها ورخص أثمانها وكذلك طول عمرها التشغيلي الذي قد يصل لعدة عشرات من السنوات.

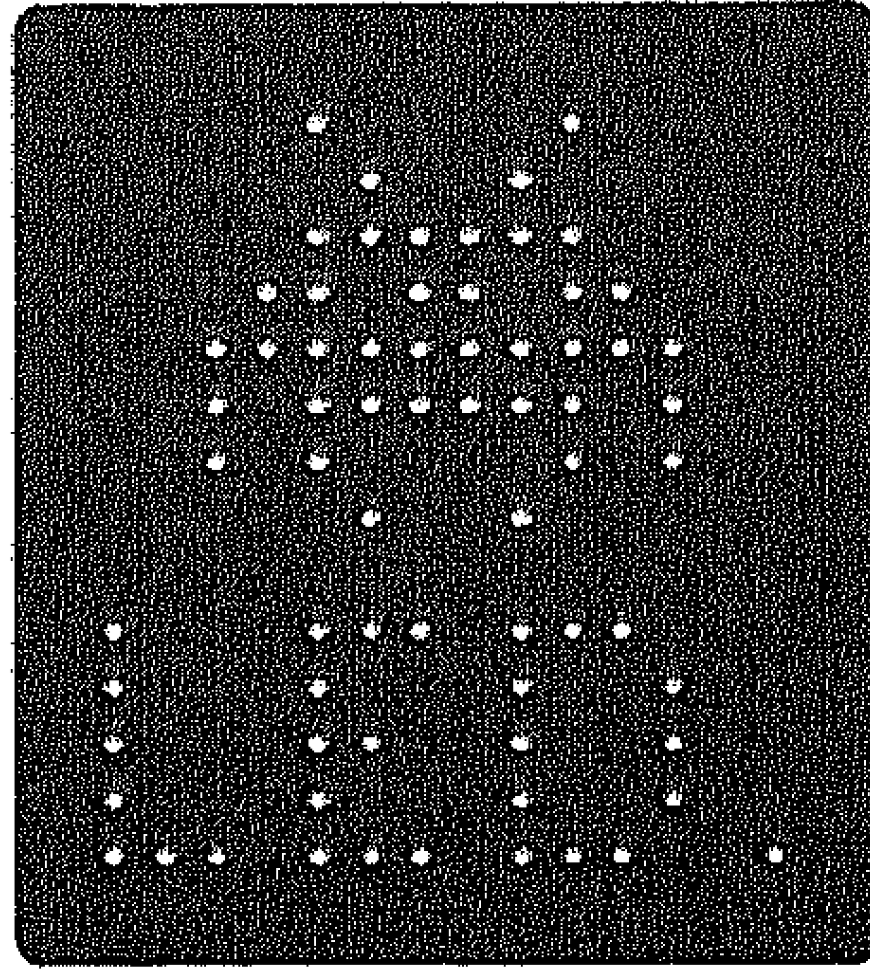
لقد دفعت بعض التطبيقات الحديثة كالحواسيب المحمولة والهواتف الخلوية والآلات الحاسبة العلماء والمهندسين للبحث عن شاشات عرض خفيفة الوزن وصغيرة الحجم لتتناسب مع هذه التطبيقات فالحواسيب المحمولة لن تكون محمولة إذا ما استخدمت شاشات أنبوب الأشعة المهبطية. ففي السبعينات من القرن العشرين بدأت أنواع جديدة من الشاشات بالظهور أطلق عليها اسم الشاشات المسطحة (flat panel displays) والتي لا يتجاوز سمكها العشر سنتيمترات حيث بدأت بأحجام شاشات صغيرة وغير ملونة تم استخدامها في الساعات والحاسبات اليدوية وأجهزة القياس الرقمية والأجهزة الطبية. وبعد نضوج تقنية هذه الشاشات وظهور الأنواع الملونة منها في التسعينات بدا في استخدامها في الحواسيب المحمولة ومن ثم في الحواسيب المكتبية والتلفزيونات. ويوجد ثلاث تقنيات رئيسية لتصنيع هذه الشاشات وهي شاشات السائل البلوري (liquid crystal display LCD) وشاشات البلازما (plasma display) وشاشات الثنائيات الباعثة للضوء (Light Emitting Diode (LED) display). وتتميز هذه الشاشات إلى جانب خفة وزنها وصغر سمكها وقلة استهلاكها للطاقة بإمكانية تصنيعها بأحجام تتراوح من تلك المستخدمة في الساعات اليدوية والهواتف الخلوية والحاسبات اليدوية إلى شاشات التلفزيون العملاقة التي قد تصل إلى ثلاثة أمتار. وتعتمد شاشات السائل البلوري في عملها على خاصية مهمة لمادة السائل البلوري



وهي إمكانية التحكم بكمية الضوء المار من خلالها من خلال قيمة الجهد الكهربائي المسلط عليها وعليه فهي تتكون من طبقة رقيقة من السائل البلوري موضوعة فوق سطح يحتوي على عدد كبير من الترانزستورات التي تتحكم بالجهد المسلط على السائل البلوري. ويتم إظهار الصور على الشاشة من خلال التحكم بكل ترانزستور بحيث يقوم كل ترانزستور بالتحكم بالضوء المار من خلال السائل البلوري عند النقطة التي يقع خلفها الترانزستور.

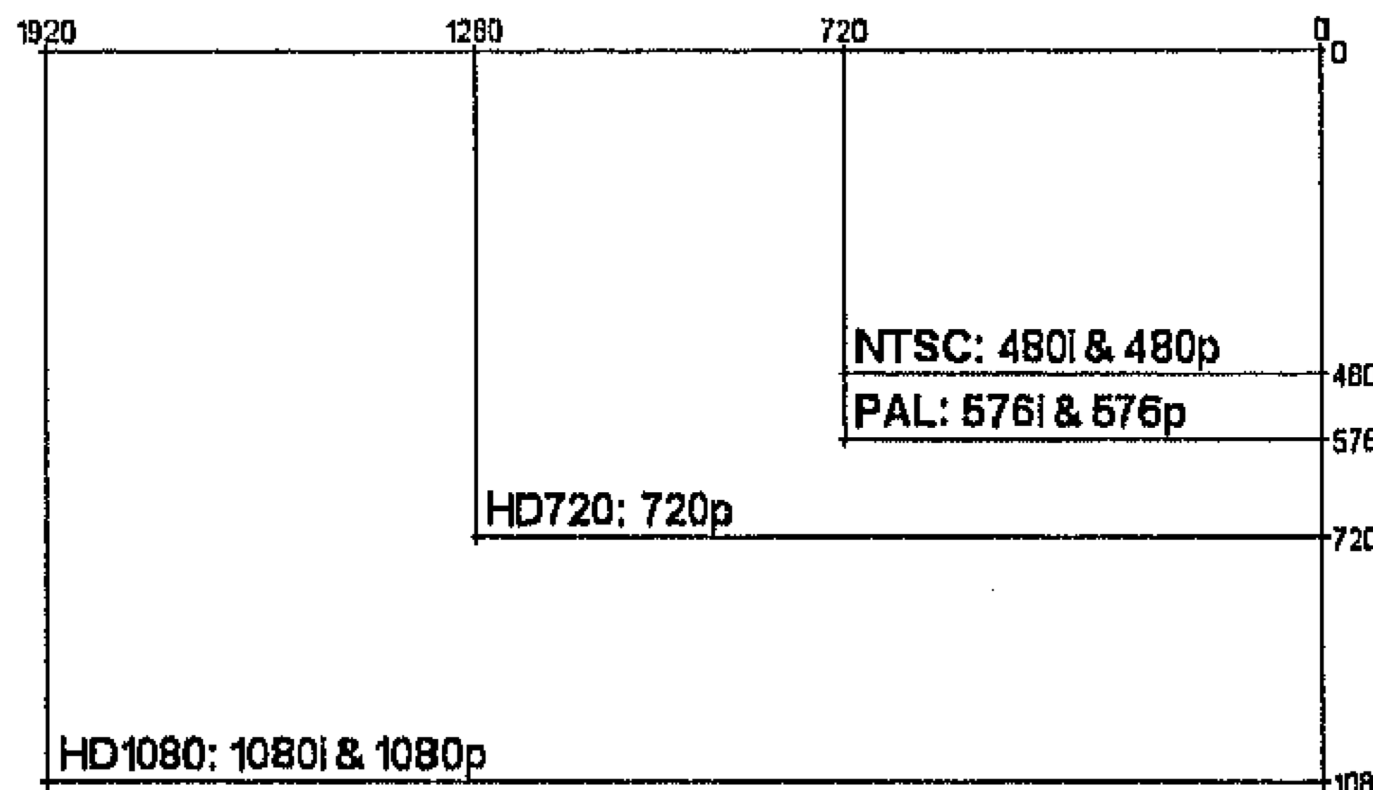


ويتم التحكم كذلك بلون الضوء المنبعث من كل نقطة من خلال استخدام طبقات من مواد تعمل كمرشحات تمرر اللون المطلوب. أما شاشات البلازما فتعمل بالاعتماد على وجود أنواع معينة من الغازات كالنيون والزنون والأرغون مخزنة داخل طبقات رقيقة من الزجاج ويتم إثارة هذه الغازات لتطلق مختلف الألوان من باستخدام جهد كهربائي مسلط عليها ويتم التحكم به باستخدام الترانزستورات. ومن الواضح أن مثل هذه الشاشات لا تعمل إلا باستخدام الإشارات الرقمية مما يستدعي وجود ذاكرات إلكترونية لتخزين الصور المعروضة. أما شاشات الثنائيات الباعثة للضوء فتستخدم عدد كبير من هذه الثنائيات الموزعة على سطح الشاشة كمجموعات كل مجموعة مكونة من ثلاثة ثنائيات تولد الألوان الرئيسية الثلاث. وبسبب سطوعها العالي بالمقارنة مع الأنواع الأخرى فهي تستخدم في شاشات العرض الخارجية وبدأ أخيرا استخدامها في شاشات التلفزيون وبمواصفات تتفوق على تقنيات العرض الأخرى.



التلفزيون الرقمي والتلفزيون الرقمي عالي الوضوح

تعتبر الأنظمة التلفزيونية من أكثر أنظمة الاتصالات صعوبة في التطوير وذلك لوجود مئات الملايين من التلفزيونات الباهظة الثمن والتي يجب أن تعدل أو تبدل في حالة تطوير أي نظام تلفزيوني جديد ولذلك فقد تأخر استخدام التقنية الرقمية في البث التلفزيوني الأرضي على الرغم من ميزاتها المتعددة كمقاومتها العالية للضجيج والتشويش وقابليتها العالية للضغط مما يقلل من عرض نطاق الإشارة التلفزيونية المرسلة. ولقد بدأ العمل على تطوير الأنظمة التلفزيونية الرقمية في عام 1993م وتم استخدامها في البداية من قبل شركات البث التلفزيوني الفضائي حيث تمكنت من خلال تقنيات ضغط متقدمة من بث عشرة قنوات تلفزيونية عبر المستجيب القمري (36 ميغاهيرتز) مقابل قناة واحدة في النظام التماثلي. وقد بدأ مؤخرا استخدام التقنية



الرقمية في أنظمة البث الأرضية وتم بث أربعة قنوات تلفزيونية رقمية عادية أو قناة تلفزيونية رقمية عالية الوضوح في نفس حيز القناة التلفزيونية التشابهية مما دفع هيئة الاتصالات الفيدرالية الأمريكية إعطاء مهلة لمحطات البث الأرضية حتى نهاية عام 2006م للتحول إلى البث الرقمي بعدها سيتم وقف البث التماثلي نهائيا. ولا يعني التحول للبث الرقمي استخدام تلفزيون رقمي بل يمكن استقبال الإشارات التلفزيونية الرقمية بواسطة جهاز استقبال رقمي يقوم بتحويل الإشارة الرقمية إلى إشارة تماثلية تغذى جهاز التلفزيون العادي.

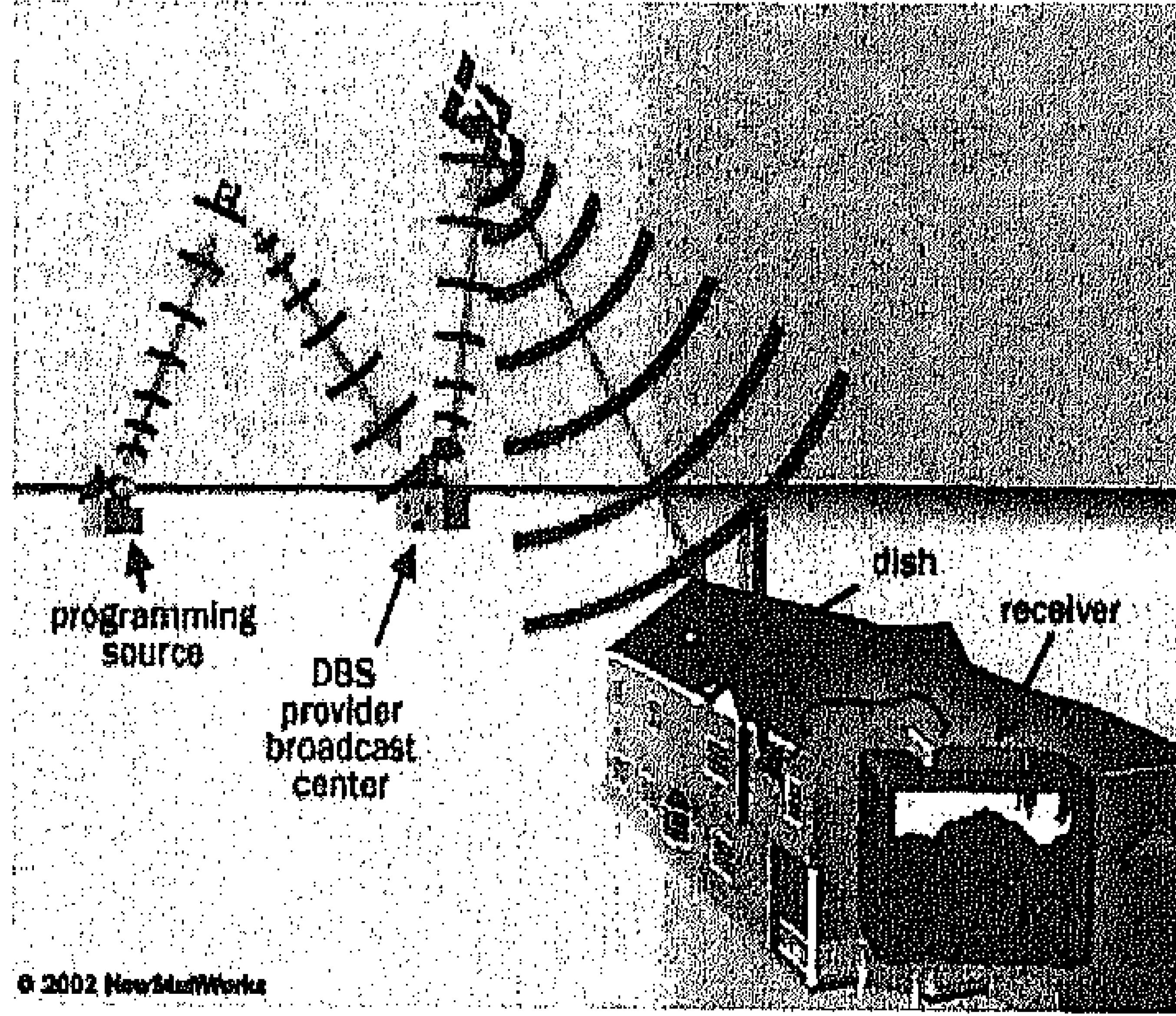
أما التطور الآخر في البث التلفزيوني فهو ما يسمى بالتلفزيون عالي الوضوح (high definition TV) الذي عمل الأمريكيون واليابانيون على تطويره بسبب التدني في وضوح الصورة في النظام التلفزيوني الأمريكي حيث يبلغ عدد خطوط المسح فيه 525 خط مقابل 625 خط في النظام الأوروبي. ويتحدد وضوح الصورة في أي نظام تلفزيوني من عدد الخطوط التي يتم بها مسح الصورة وكذلك من أبعاد شاشة التلفزيون فكلما زاد عدد الخطوط كلما ازداد وضوح الصورة وكلما زادت أبعاد الشاشة كلما قل وضوحها وذلك لتباعد المسافة بين الخطوط خاصة لمن يجلس قريبا منها ولهذا السبب لم يتجاوز البعد القطري لأكبر شاشة تلفزيون 80 سنتيمتر. وقد تم زيادة عدد خطوط المسح في الأنظمة العاملة حاليا للتلفزيون عالي الوضوح إلى 1080 خط في الاتجاه الرأسي بينما تبلغ نسبة العرض إلى الارتفاع في الشاشة 16 إلى 9 مقابل 4 إلى 3 في التلفزيون العادي وبهذا تبلغ قدرة التمييز في الصورة إلى 1920 في الاتجاه الأفقي و 1080 في الاتجاه الرأسي أي ما يقارب مليوني بكسل (pixel) وتبدو الصورة في هذا النظام كأحسن الصور المعروضة على الشاشات السينمائية. ولكن تواجه هذا النظام عدة مشاكل أهمها عدم التوافق مع الأنظمة المستخدمة حاليا وكذلك عرض النطاق الكبير الذي ستحتله الإشارة التلفزيونية على الطيف الترددي حيث تحتل حيزا يتسع لأربع إشارات تلفزيونية عادية في حالة الإرسال التماثلي. ولكن مع التحول إلى نظام البث الرقمي فقد تمكنت بعض المحطات من بث إشارة تلفزيونية رقمية عالية الوضوح ضمن عرض النطاق المخصص للإشارة التلفزيونية التشابهية باستخدام تقنيات الضغط المختلفة كتقنية (MPEG-2).

البث التلفزيوني بالكبلات والبث التلفزيوني من الأقمار الصناعية

بدأ استخدام الكبلات المحورية لتوزيع الخدمة التلفزيونية على المشتركين مع ظهور البث التلفزيوني حيث قامت بعض الشركات بتقديم هذه الخدمة للمناطق التي لا تصلها الإشارات التلفزيونية الهوائية إما لبعدها أو لوجود عوائق طبيعية تحول دون وصولها. وقد تزايد الطلب على هذه الخدمة بعد أن وفرت هذه الشركات عدد كبير من القنوات التلفزيونية التي يتم التقاطها من المحطات التلفزيونية البعيدة أو يتم تجميع برامجها من المواد المسجلة على أشرطة الفيديو. ويتكون نظام الكبلات التلفزيوني من محطة رئيسية تقوم بتجميع القنوات التلفزيونية من مصادرها المختلفة عن طريق الهوائيات التلفزيونية والكبلات المحورية ووصلات الموجات الدقيقة ثم يتم نقل هذه القنوات عبر كبلات محورية رئيسية إلى المناطق المخدومة التي يتفرع منها كبلات لمنازل المشتركين. وتنتشر خدمة الكبلات التلفزيونية على نطاق واسع في معظم الدول حيث تمتاز بنقاء الإشارات التلفزيونية ووجود عشرات القنوات التلفزيونية وإمكانية تقديم برامج حسب طلب المشترك بما يسمى الخدمة التلفزيونية تحت الطلب. ومع ظهور خدمة البث التلفزيوني المباشر من الأقمار الصناعية بدأت هذه الخدمة بالتراجع ولكن يتوقع لها أن تزدهر مع التوجه لاستخدام كبلات الألياف الزجاجية التي يمكنها

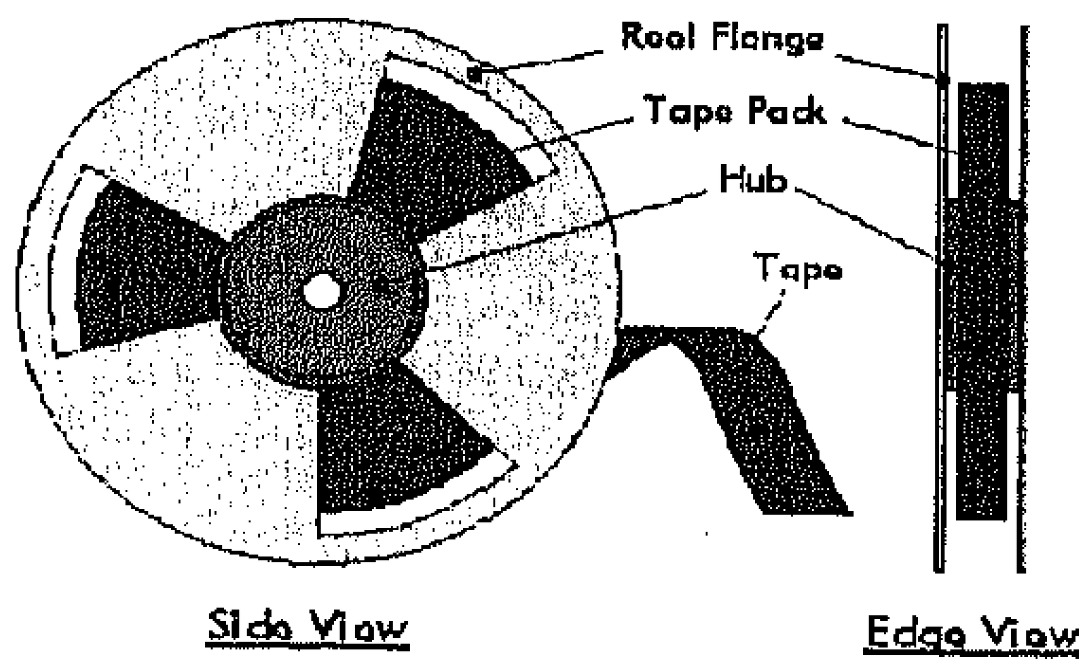
حمل عدد كبير من القنوات التلفزيونية إلى جانب نقل خدمات أخرى كخدمة التلفزيون تحت الطلب وخدمة الإنترنت.

أما خدمة البث التلفزيوني المباشر من الأقمار الصناعية إلى المنازل فقد بدأت بالظهور في الثمانينات بعد أن تم زيادة قدرة بث الأقمار الصناعية نتيجة لرفع كفاءة الخلايا الشمسية وزيادة حساسية المستقبلات الأرضية. ويتكون هذا النظام من قمر صناعي متزامن يتم وضعه فوق المنطقة المراد تغطيتها ويحمل على ظهره عشرات المستجيبات التي يمكن لكل منها استقبال قناة تلفزيونية أو أكثر من المحطات الأرضية فتعيد بثها إلى الأرض. وفي المنازل تقوم هوائيات صحنية توضع على أسطحها بالتقاط بث هذه الأقمار من خلال لواقط توضع في بؤرتها علما بأن كسب الصحن يزداد مع مربع قطره ولكن عيبها أن كسبها يقل بشكل كبير إذا انحرفت الأمواج الساقطة عن الاتجاه العمودي على الصحن ولهذا فعند توجيهها باتجاه محدد فإنها لا تستقبل إلا إشارات الأقمار الواقعة ضمن زاوية نظرها الضيقة جدا. ويمكن للمشترك اختيار القناة التلفزيونية من بين مئات القنوات من خلال توجيه الهوائي يدويا أو ذاتيا باتجاه أحد الأقمار الصناعية الموجودة في سماء تلك المنطقة. ويزيد عدد أقمار البث التلفزيوني المباشر اليوم عن مائة قمر موزعة على المدار المتزامن بحيث تغطي مناطق جغرافية مختلفة على سطح الأرض وتبث آلاف القنوات التلفزيونية لمختلف الأغراض. ومع التحول من البث التماثلي إلى البث الرقمي في منتصف التسعينات تم زيادة عدد القنوات التي تبثها هذه الأقمار إلى عشرة أضعاف مما هي عليه بسبب القابلية العالية للإشارات التلفزيونية الرقمية للضغط هذا إلى جانب الحصول على درجات نقاء ووضوح عاليتين في الصوت والصورة. ويمكن للقارئ أن يجد مزيدا من المعلومات عن هذا الموضوع في فصل الأقمار الصناعية.



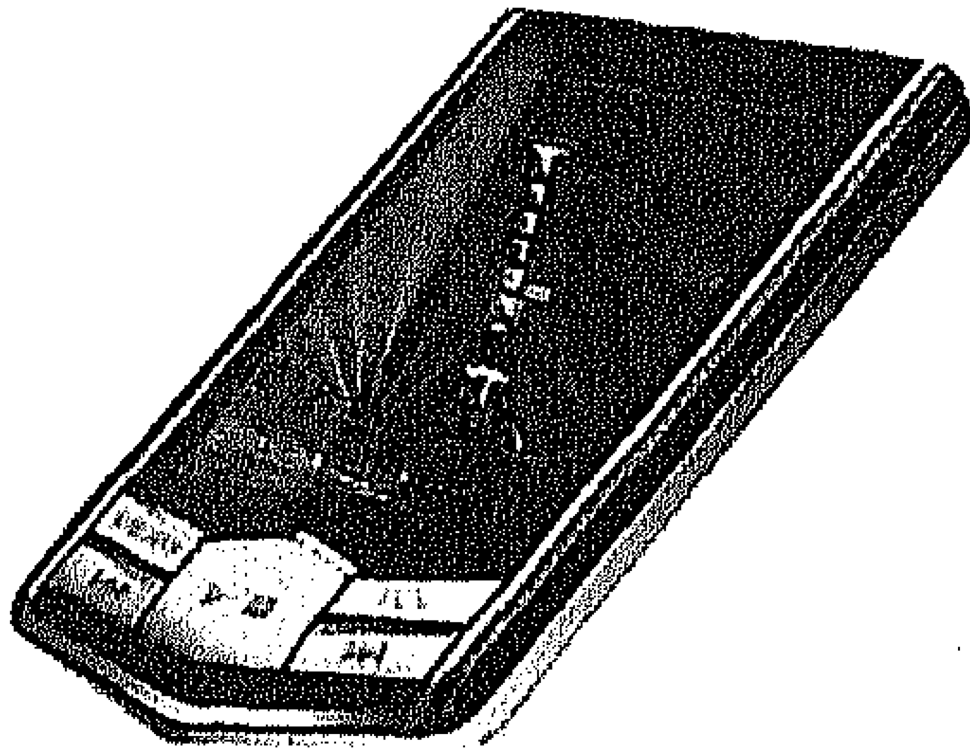
4-6 المسجلات السمعية والمرئية (Audio & Video Recorders)

إن محطات البث الإذاعي والتلفزيوني ما كان لها لتعمل على الوجه الأكمل بدون وجود المسجلات السمعية والمرئية ففي غيابها يلزم أن يكون جميع ما تبثه هذه المحطات حيا ومباشرا ويلزم على جميع من يساهم في أي برنامج من برامجها أن يتواجدوا في مباني هذه المحطات في أوقات محددة ليقدموا برامجهم. ولكن وجود المسجلات السمعية والمرئية سهل الأمر كثيرا حيث أن معظم مواد البرامج التي تبثها هذه المحطات يتم تسجيلها في مواقع إجرائها أو حدوثها ومن ثم تبثها المحطات في الوقت المناسب. لقد تم اختراع المسجلات السمعية في الثلاثينات من القرن العشرين وتتكون من شريط بلاستيكي



مرن مغطى بطبقة رقيقة من مادة مغناطيسية ويتم تسجيل الأصوات على الشريط المغناطيسي بعد أن يتم تحويلها باستخدام الميكرفون إلى إشارة كهربائية يتم تمريرها في ملف رأس التسجيل الذي يقوم بتوليد مجال مغناطيسي تتغير قيمته بتغير قيمة الإشارة فيعمل بدوره على تغيير خصائص المادة المغناطيسية الموجودة على سطح الشريط والذي يتحرك بسرعة ثابتة أمام رأس التسجيل باستخدام محرك كهربائي ثابت السرعة ويتم استرجاع المعلومات السمعية بتحريك الشريط المغناطيسي أمام رأس التسجيل الذي يتولد في ملفه تيار كهربائي تتناسب شدته مع شدة المجال المغناطيسي الذي تنتجه المادة المغناطيسية ومن ثم يتم تحويل الإشارة الكهربائية المتولدة في الملف بعد تكبيرها إلى إشارة صوتية باستخدام السماعات. وكان الشريط في الأنواع الأولى من المسجلات يتم لفه على بكرات مفتوحة كبيرة الحجم يتم وضعها على جهاز التسجيل ولذا سمي هذا النوع مسجل شريط البكرة–إلى– البكرة (reel-to-reel tape recorder) إلى أن ظهرت في بداية الستينات مسجلات الكاسيت (cassette recoders) الصغيرة الحجم حيث يوجد الشريط على بكرات في داخل علبة بلاستيكية يتم وضعها في داخل المسجل عند التسجيل أو الاستماع. وقد كانت سرعة تحريك الشريط في المسجل هي المحدد لنوعية الصوت فكلما ارتفعت السرعة كان الصوت أفضل وتتراوح السرعات بين عدة سنتيمترات في الثانية للأنواع الرخيصة إلى ما يزيد عن سبعين سنتيمتر في الثانية للأنواع الممتازة ولكن يتطلب هذا الأمر زيادة طول الشريط بشكل كبير لنفس مدة التسجيل. ولا تختلف المسجلات المرئية عن المسجلات السمعية من حيث مبدأ العمل إلا أنها أكثر تعقيدا بسبب ارتفاع ترددات الإشارات المرئية والتي قد تزيد بألف مرة عن ترددات الإشارات السمعية مما يستلزم استخدام دوائر إلكترونية ومحركات كهربائية ذات مواصفات عالية. وقد تم تصنيع أول مسجل كاسيت مرئي (video cassette recorder VCR) في عام 1956م واقتصر استخدامه على المحطات التلفزيونية بسبب ارتفاع ثمنه وفي عام 1965م تم تصنيع مسجلات بأسعار منخفضة نسبيا لأغراض الاستخدام المنزلي.

ومع التحول إلى التقنية الرقمية في نقل الإشارات السمعية والمرئية بدأ التحول إلى الطرق الرقمية لتخزين هذه الإشارات وبدأ باستخدام جميع وسائل التخزين الرقمية المستخدمة في الحاسوب لهذا الغرض كالأقراص الصلبة والمرنة والأقراص الضوئية وغيرها. أما أحدث تقنيات المسجلات السمعية والمرئية فهي ما يسمى بالمسجلات السمعية والمرئية الرقمية (&digital audio video players) والتي تستخدم التقنية الرقمية مع تقنيات الضغط المسماه (MP3 &MP4). فمسجلات (MP3) تستخدم لتخزين وعرض الإشارات السمعية بينما تستخدم مسجلات (MP4) لتخزين وعرض الإشارات المرئية وغالبا ما يستخدم مسجل واحد لكلي النوعين من الإشارات. وتتميز المسجلات الرقمية بسعتها العالية للتخزين التي قد تصل لمئات الساعات في الإشارات السمعية وعشرات الساعات في الإشارات المرئية مقابل عدة ساعات في المسجلات التماثلية القديمة. أما الميزة الأخرى فهي سهولة الوصول للملفات الصوتية والمرئية المراد سماعها أو مشاهدتها من خلال استعراض هذه الملفات على شاشة المسجل كما هو الحال مع التعامل مع الملفات في الحاسوب.

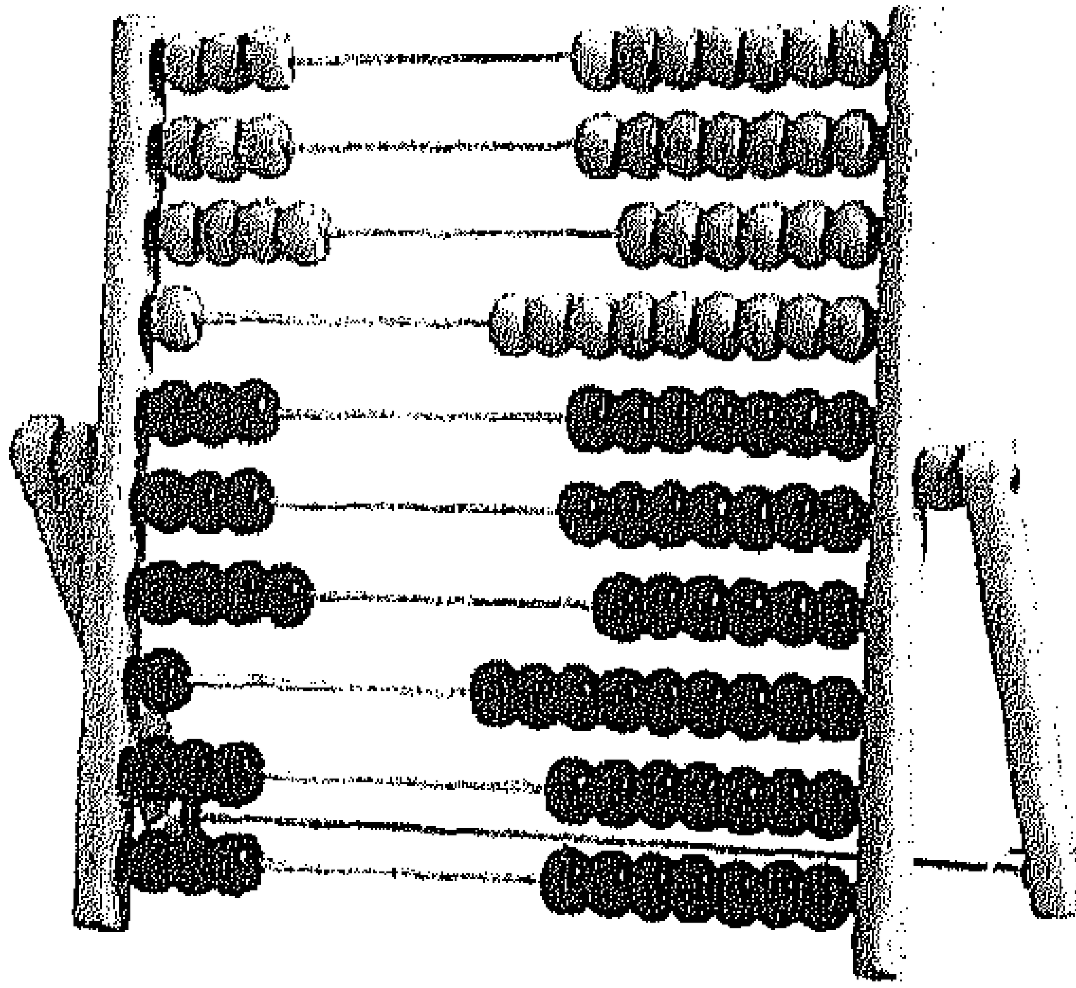


الفصل السابع

الحاسوب وشبكات المعلومات

7-1 تمهيد

احتاج البشر للعمليات الحسابية منذ فجر التاريخ وكانت عمليات الجمع والطرح والقسمة والضرب هي أقصى ما احتاجوه لإنجاز معاملاتهم المالية وأعمالهم الهندسية البسيطة ولقد كانت الطريقة اليدوية هي الطريقة الشائعة لإجراء الحسابات باستثناء بعض الآلات التي استخدمها الصينيون كآلة الأباكس (Abacus). ومع بزوغ الثورة العلمية في مطلع القرن السابع عشر تزايدت حاجة العلماء لإجراء عمليات حسابية أكثر تعقيدا وأصبحت الحاجة ماسة لوسائل تساعدهم على إجراء حساباتهم بشكل أسرع مما كانت عليه. وقد تمكن العالم الفرنسي باسكال في عام 1643م من تصنيع أول آلة حاسبة ميكانيكية تستخدم التروس لإجراء عمليات الجمع والطرح وقد تم تطويرها فيما بعد لإجراء عمليات الضرب والقسمة. ومع اكتشاف الكهرباء في مطلع القرن التاسع عشر تم استخدام المحركات والمرحلات الكهربائية لصناعة حاسبات كهروميكانيكية تقوم بنفس المهام إلا أنها أسرع من الحاسبات الميكانيكية. وبقيت سرعة الآلات الحاسبة محكومة بسرعة حركة يد الإنسان عند إدخال الأرقام إلى أن تمكن بعض العلماء في منتصف القرن التاسع عشر من زيادة سرعتها من خلال إدخال الأرقام باستخدام الأشرطة الورقية المثقبة. وفي بداية القرن العشرين برزت فكرة تخزين نتائج الحسابات الآنية في ذاكرة مؤقتة لاستخدامها في عمليات حسابية لاحقة وقد تم استخدام المرحلات الكهربائية والصمامات الإلكترونية كذاكرات في عدد من هذه الآلات التي أطلق عليها اسم الحاسبات المبرمجة.



أما الفكرة الرائدة التي أدت إلى زيادة سرعة الحاسبات فهي فكرة تخزين جميع الخطوات اللازمة لإجراء المهام الحسابية مع الأرقام المراد معالجتها في الذاكرة ومن ثم يترك الأمر للآلة الحاسبة لتنفيذ المهمة بشكل تلقائي دون تدخل العامل البشري وقد أطلق اسم الحاسوب على هذه الآلة الذكية تمييزا لها عن الآلة الحاسبة العادية. وفي بداية الأربعينات بدأ العمل في كل من أمريكا وأوروبا على تصنيع الحواسيب التي تستخدم التقنية الرقمية الثنائية لإجراء العمليات الحسابية بدلا من الأرقام العشرية. وتتطلب التقنية الرقمية التعامل مع مستويين اثنين فقط من الجهد الكهربائي يتم تمثيلهما كهربائيا من خلال فتح وإغلاق مفاتيح ميكانيكية أو إلكترونية. وقد نجح العلماء في النصف الثاني من الأربعينات من تصنيع عدد من هذه الحواسيب باستخدام الصمامات الإلكترونية وكانت سرعتها تفوق بآلاف المرات سرعة أفضل الآلات الحاسبة الكهروميكانيكية المستخدمة في ذلك الوقت رغم أنها كانت كبيرة الحجم وتستهلك كميات كبيرة من الطاقة. ومع استخدام الترانزستورات في منتصف الخمسينات والدوائر المتكاملة في بداية الستينات في صناعة

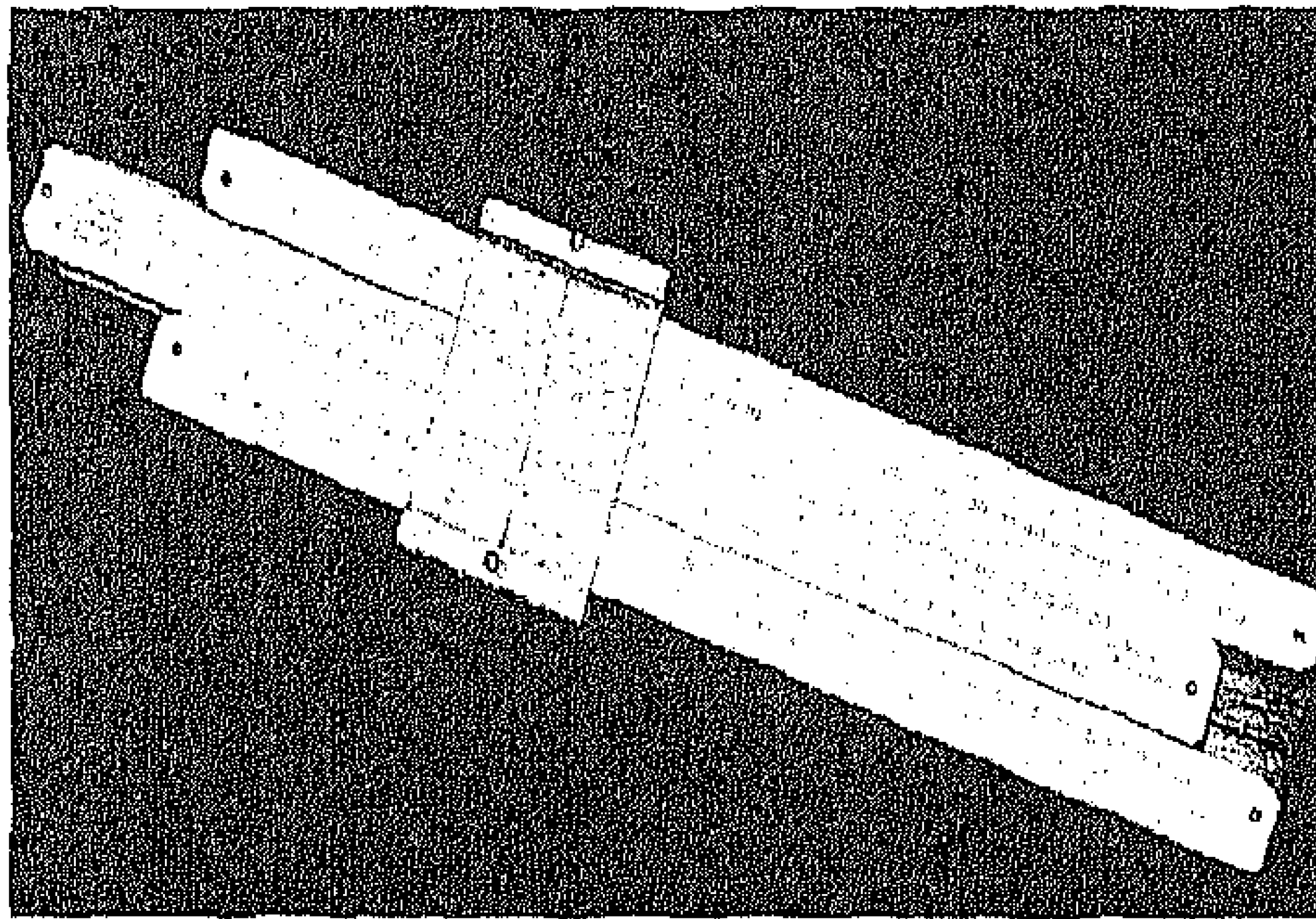
الحواسيب تقلصت أحجامها ومعدلات استهلاكها للطاقة بشكل كبير جدا بحيث أمكن تصنيع حواسيب بحجم الخزانة الصغيرة بعد أن كانت تملأ عدة غرف. ومع اكتشاف قدرة الحاسوب الفائقة على إجراء مختلف العمليات الحسابية والمنطقية بدأ المختصون بكتابة برامج حاسوبية لمختلف التطبيقات العلمية والهندسية والمالية والتجارية فأزداد الطلب عليها من قبل مراكز الأبحاث والجامعات والبنوك والشركات الصناعية على الرغم من ارتفاع أثمانها التي وصلت لمئات الآلاف من الدولارات. ولم يقتصر استخدام الحاسوب على إجراء العمليات الحسابية وحل المعادلات الرياضية بل تمت برمجته للقيام بمهام لا حصر لها كقدرته على تخزين ومعالجة واسترجاع مختلف أنواع المعلومات الكتابية والرسومية والسمعية والمرئية وقدرته على عمل التصاميم الهندسية والفنية في مختلف قطاعات الإنشاءات والصناعات وقدرته على عمل محاكاة لكثير من الأنظمة الطبيعية والصناعية وقدرته على تبادل المعلومات مع الحواسيب الأخرى من خلال ما يسمى بشبكات المعلومات.

أما التطور الأكثر إثارة في تاريخ الحاسوب فهو تمكن شركة إنتل الأمريكية في بداية السبعينات من تصنيع معظم مكونات الحاسوب على رقاقة لا تتجاوز أبعادها عدة سنتيمترات وقد أطلق عليه اسم المعالج الدقيق. وقد فتح هذا الإنجاز التكنولوجي العظيم أبوابا لا حصر لها من التطبيقات التي لم تكن لتخطر حتى على بال كتاب الخيال. ففي غضون سنوات قليلة بعد تصنيع أول معالج دقيق ظهرت في الأسواق الآلات الحاسبة اليدوية الإلكترونية ومن ثم الحواسيب الشخصية أو المنزلية التي بدأت بالدخول في معظم المنازل لصغر حجمها ورخص أثمانها. وقد تزامن مع ظهور هذه الحواسيب المنزلية عشرات البرامج لمختلف التطبيقات كالبرامج التعليمية والترفيهية ومعالجة النصوص والبيانات المجدولة وبرامج الرسم والتصميم. وأما الاستخدام الأكثر أهمية للمعالج الدقيق فهو لأغراض المراقبة والتحكم بمختلف أنواع الأجهزة والمعدات والمصانع والمركبات والطائرات والقطارات ومحطات التوليد الكهربائية ومصافي البترول. وقد تحولت بفضل المعالج الدقيق كثير من الأجهزة الكهربائية والميكانيكية والطبية إلى أجهزة ذكية وبقدرات ومواصفات كان من الصعب تحقيقها بدونه كما هو مشاهد في التلفزيونات وأجهزة التسجيل السمعية والمرئية والهواتف الثابتة والخلوية والألعاب الإلكترونية وفي الثلاجات والغسالات والأفران وفي المصاعد والإشارات الضوئية والموازين الإلكترونية ومختلف أنواع أجهزة الفحص والقياس والتحكم والأجهزة المخبرية والطبية. إن الثورة التي أحدثها الحاسوب في حياة الناس لا تقل عن الثورات التي حدثت في مجالات أنظمة الاتصالات الكهربائية وأنظمة نقل الطاقة الكهربائية وأنظمة القياس والتحكم والتي نتجت عن اختراع الكهرباء في مطلع القرن التاسع عشر واختراع الصمام الإلكتروني في مطلع القرن العشرين واختراع الترانزستور في منتصف القرن العشرين.

لقد لعب الحاسوب دورا بارزا في ظهور ما يسمى بثورة المعلومات في حياة الناس حيث كان يتم تخزين وتداول المعلومات قبل اختراع الحاسوب من خلال الكتب والمجلات والجرائد والرسائل والتي كان يتطلب الوصول إليها والحصول عليها جهدا بالغا وثمنا باهظا. فبفضل الحاسوب ظهرت شبكات الحواسيب المختلفة التي تربط المستخدمين في الجامعات والبنوك والمصانع والشركات ومراكز الأبحاث والمؤسسات الحكومية والخاصة مع بعضهم البعض لتسهيل تبادل مختلف أنواع المعلومات بينهم. وقد توجت هذه الشبكات بإنشاء ما يسمى بشبكة الشبكات أو شبكة الإنترنت والتي تربط جميع الشبكات التي تعد بالملايين والموزعة في جميع أرجاء الكرة الأرضية ببعضها البعض مما مكن المستخدمين من تبادل المعلومات فيما بينهم في لمح البصر مهما كانت المسافات التي تفصل بينهم. وتقدم شبكة الإنترنت لمستخدميها عدد لا حصر له من

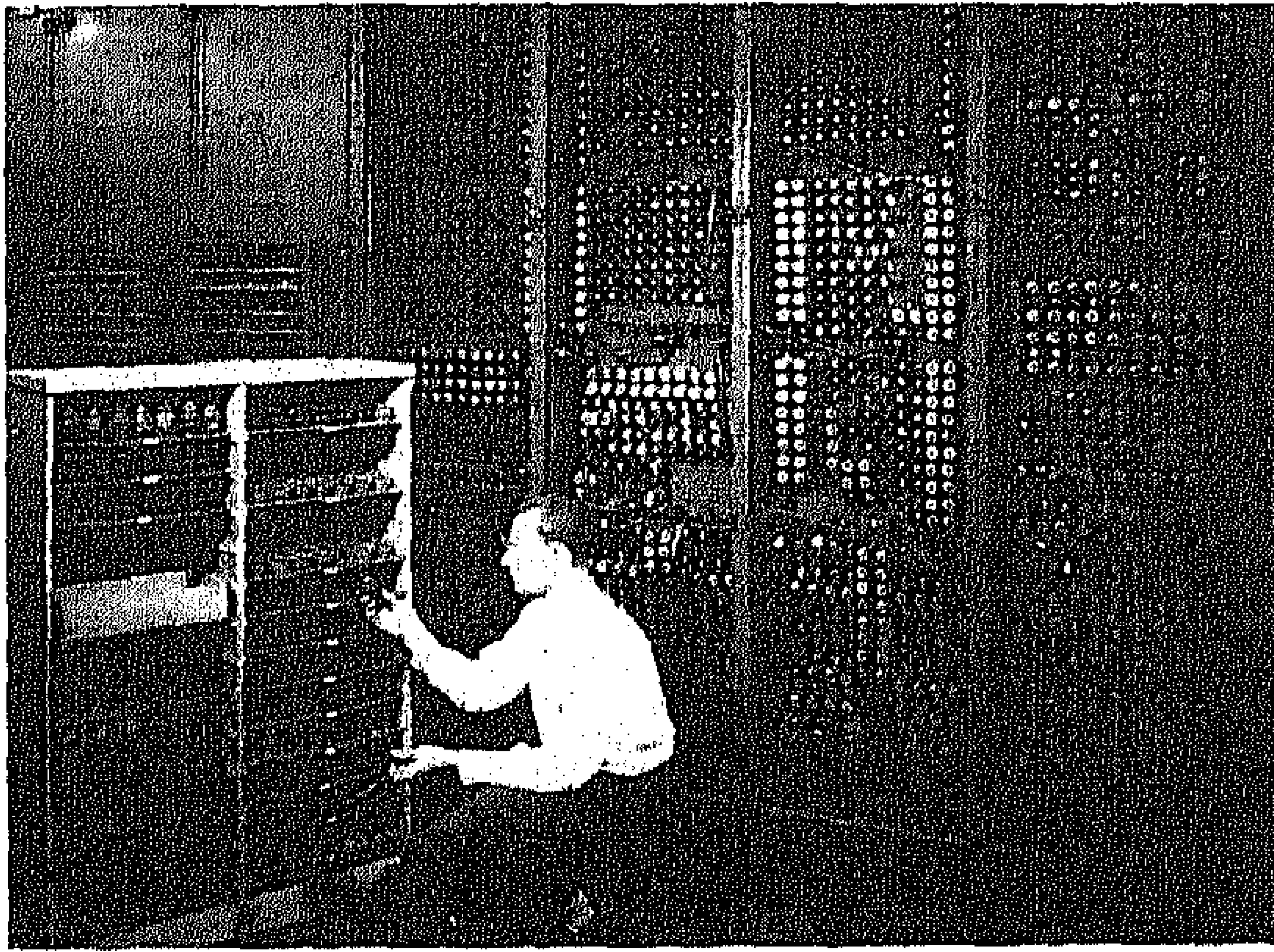
الخدمات كخدمة البريد الإلكتروني وخدمة الدردشة أو الرسائل الآنية وخدمة تبادل الملفات وخدمة إجراء المكالمات الهاتفية وكذلك خدمة التجارة الإلكترونية التي تتيح للصناع والتجار عرض منتجاتهم وبضائعهم من خلال الشبكة وتمكن الزبائن من التجول في هذه الأسواق الإلكترونية وخدمة البحث والتصفح في شبكة المعلومات العالمية والتي تمكن المستخدم من الوصول إلى عدد لا حصر له من المواقع التي تحوي على مختلف أنواع المعلومات العلمية والصناعية والطبية والثقافية والفنية والترفيهية والرياضية والإخبارية والسياحية والتجارية.

2-7 تاريخ الحاسوب



يرجع تاريخ تطور الحاسوب الحديث إلى بداية القرن السابع عشر مع ظهور ما يسمى بالثورة العلمية في مجالات علمية مختلفة كعلوم الفلك والرياضيات والفيزياء والميكانيكا والتي احتاج العلماء فيها إجراء عمليات رياضية أكثر تعقيدا من العمليات الحسابية البسيطة التي كانوا يحتاجونها قبل ذلك. ففي عام 1617م تمكن العالم السكوتلندي نابير من اختراع المسطرة المنزلقة (slide rule) والتي يمكنها إجراء العمليات الحسابية الأساسية وكذلك إيجاد اللوغاريتمات. وبسبب خفة وزن هذه المسطرة فقد انتشر استخدامها انتشارا واسعا واستمر استخدامها من قبل الباحثين وطلبة الجامعات إلى منتصف السبعينات من القرن العشرين. وفي عام 1643م تمكن العالم الفرنسي باسكال من تصنيع أول حاسبة ميكانيكية باستخدام التروس يمكنها إجراء عمليات الجمع والطرح وقد تمكن عالم الرياضيات الألماني ليبنز في عام 1674م من تطوير حاسبة باسكال لتشمل عمليات الضرب والقسمة. وفي عام 1890م وبعد اختراع المحركات الكهربائية تمكن الأمريكي هوليرث (Herman Hollerith) من تصنيع أول آلة حاسبة كهروميكانيكية وقد قام لأول مرة باستخدام البطاقات والأشرطة الورقية المثقبة (punched cards & tapes) في محاولة لتسريع عملية إدخال الأرقام إلى هذه الحاسبة والتي كان يتم إدخالها يدويا. وفي عام 1930م تم تصنيع أول حاسوب تشابهي غير رقمي يستخدم مضخمات العمليات (operational amplifiers) المصنعة من الصمامات الإلكترونية وتمتاز هذه الحواسيب التشابهية بقدرتها على حل المعادلات التفاضلية والتكاملية من خلال تمثيل الكميات الرياضية باستخدام الجهود والتيارات الكهربائية. وفي عام 1937م تمكن العالم الإنكليزي ألن تورنغ (Alan Turing) من تصنيع أول آلة حاسبة إلكترونية باستخدام الصمامات الإلكترونية وقد تم استخدام هذه الحاسبة أثناء الحرب العلمية الثانية لفك الشيفرات التي استخدمها الألمان في نقل المعلومات بين وحداتهم العسكرية فكانت سببا في انتصار قوات الحلفاء على الألمان. وفي عام 1938م تمكن الألماني زيوس من تصنيع أول حاسبة إلكترونية تستخدم الأرقام الثنائية بدلا من الأرقام العشرية بينما تمكن الأمريكي ستيبتس في عام 1939م من تصنيع آلة حاسبة تستخدم المنطق الرقمي لإجراء العمليات الحسابية.

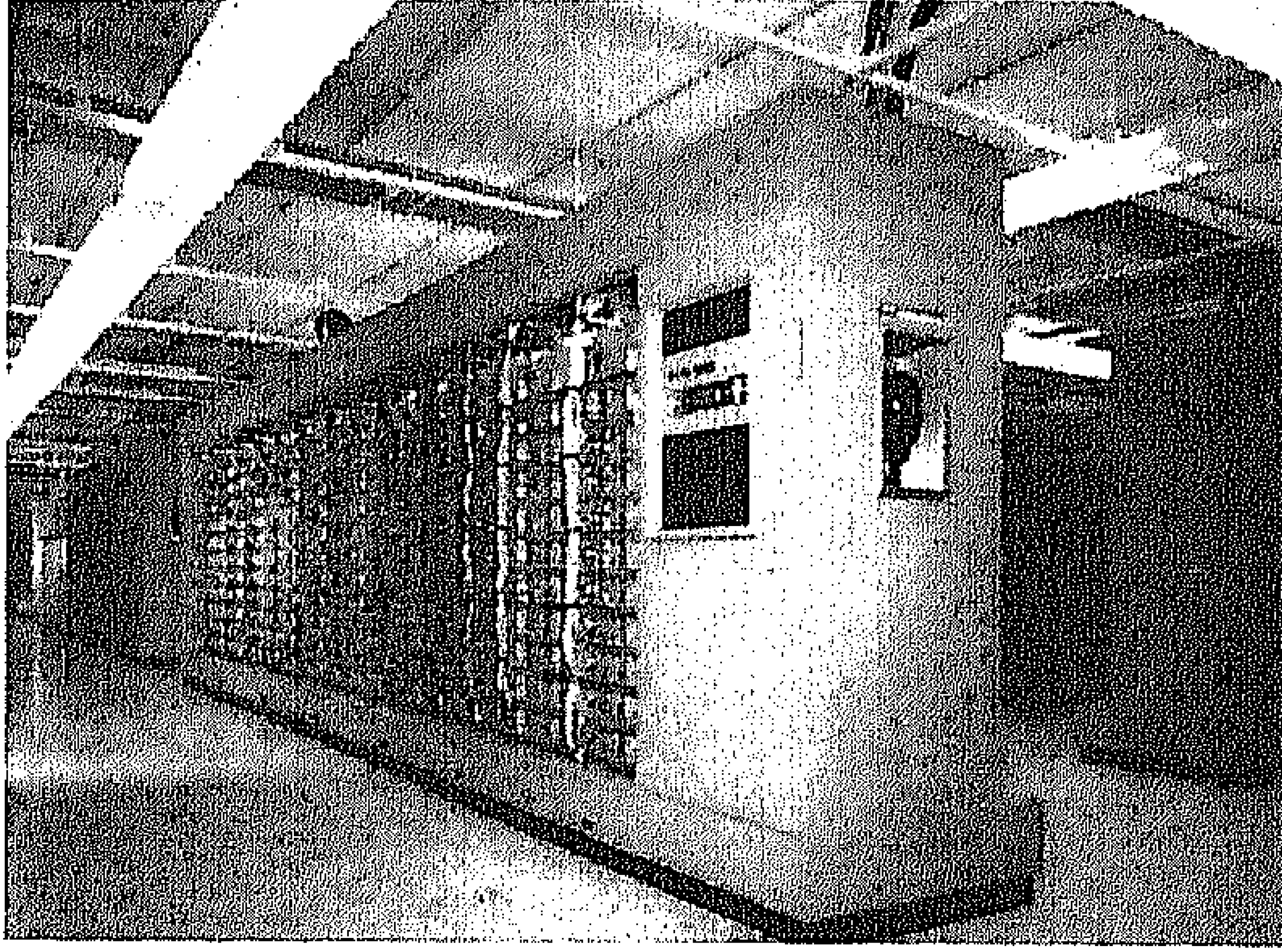
وفي عام 1943م بوشر العمل في تصنيع أول حاسوب إلكتروني رقمي في قسم الهندسة الكهربائية في جامعة بنسيلفانيا الأمريكية بدعم من وزارة الدفاع الأمريكية التي كانت تشرف إشرافا مباشرا على هذا المشروع وذلك لأهميته البالغة في الحرب العالمية الثانية حيث كانت الحاجة ماسة لأجهزة حاسبة سريعة لتحديد مسارات الصواريخ والقذائف والتي كانت يستغرق حسابها عدة أيام باستخدام الآلات الحاسبة الكهروميكانيكية. وقد تم الانتهاء من تصنيع هذا الحاسوب الإلكتروني الذي أطلق عليه اسم إينياك (EINAC) في عام 1946م حيث استخدم في تصنيعه تسعة عشر ألف صمام إلكتروني مثبتة داخل أربعين خزانة حديدية وكان يحتل ما مساحته مائتي متر مربع ويستهلك 174 كيلواط من الطاقة الكهربائية. وكانت برمجة هذا الحاسوب تتم من خلال التحكم بأعداد كبيرة من المفاتيح والكيبلات الموجودة على واجهات تلك الخزائن والتي يتم تغيير ترتيبها عند تغيير البرنامج أما البيانات فقد تم إدخالها وإخراجها باستخدام البطاقات والأشرطة الورقية المثقبة. وكانت القدرة الحسابية لهذا الحاسوب العملاق خمسة آلاف عملية في الثانية وهي سرعة ضئيلة جدا بالمقارنة مع سرعات الحواسيب الحديثة إلا أنها كانت تزيد ألف مرة عن سرعة الآلات الحاسبة الكهروميكانيكية. وبهذه السرعة المتواضعة تم حساب مسار أحد الصواريخ في ثلاثين ثانية مقارنة بعشرات الساعات التي كانت تستغرقها هذه العملية باستخدام الآلات الحاسبة الكهروميكانيكية. وفي عام 1945م قام كل من ألن تورنغ (Alan Turing) الإنكليزي وجون فون نيومان (John Von Neumann) الهنغاري الأصل الأمريكي الجنسية وبشكل مستقل بنشر مقالتين علميتين عما سمي حينئذ بالحاسوب ذي البرنامج المخزن التي تعتمد فكرته على تخزين البرنامج المراد تنفيذه والبيانات اللازمة في ذاكرة الحاسوب والذي يقوم بشكل تلقائي بتنفيذ الأوامر الموجودة في البرنامج دون تدخل العامل البشري. وقد تم تعديل الحاسوب إينياك في عام 1948م بحيث تم إدخال البرنامج جنبا إلى جنب مع البيانات إلى ذاكرة الحاسوب وتم كذلك البدء بتصنيع حواسيب جديدة ذات برامج مخزنة كان أهمها حاسوب جامعة كيمبردج البريطانية الذي ظهر في عام 1949م وحاسوب الهيئة الوطنية الأمريكية للمقاييس الذي ظهر في عام 1950م وحاسوب جامعة مانشستر البريطانية الذي ظهر في عام 1951م وقد تم بيع أول حاسوب لدائرة الإحصاءات الأمريكية في عام 1951م.



Replacing a bad tube meant checking among ENIAC's 19,000 possibilities.

ومع اختراع الترانزستور في عام 1947م تم استخدامه في منتصف الخمسينات في بناء الجيل الثاني من الحواسيب التي أصبحت أصغر حجما وأقل استهلاكا للطاقة بسبب صغر حجم الترانزستور الذي لا يزيد عن عشر حجم الصمام الإلكتروني وكان الحاسوب الذي تم تصنيعه في مختبرات بل الأمريكية في عام 1954م أول حواسيب هذا الجيل. وخلال هذه الفترة بدأت شركات تصنيع الحواسيب التجارية بالظهور وكان من أهمها شركة أي بي أم (IBM) الأمريكية التي قامت بتصنيع حاسوبها الأول الذي باعت منه ألف وثمانمائة حاسوب خلال ثمان سنوات. وفي الستينات ظهر الجيل الثالث من الحواسيب التي استخدمت في

تصنيعها الدوائر المتكاملة ذات النطاق الصغير والمتوسط والتي تم اختراعها في عام 1958م حيث تحتوي الدائرة المتكاملة صغير النطاق على عشرة ترانزستورات والمتوسطة النطاق على مائة ترانزستور. وتم كذلك إحلال الذاكرات الإلكترونية المصنعة من الترانزستورات محل ذاكرات القلوب المغناطيسية التي كانت تحتل حيزا كبيرا من حجم الحاسوب وتم استخدام الطابعات بدلا من الأشرطة الورقية المثقبة كوحدات إخراج بينما بقيت وحدات الإدخال تستخدم البطاقات المثقبة. وبسبب تزايد الطلب على الحواسيب من قبل مستخدمين تتفاوت حاجاتهم الحسابية وقدراتهم المالية بشكل كبير كالجامعات والبنوك والشركات الصناعية ومراكز الأبحاث فقد بدأت شركات تصنيع الحواسيب بإنتاج حواسيب ذات قدرات حسابية وتخزينية متفاوتة.



وقد تم تقسيم هذه الحواسيب من حيث قدراتها إلى ثلاثة أنواع وهي الحواسيب العملاقة والكبيرة والصغيرة حيث يطلق مصطلح الحاسوب العملاق (super computer) على الحاسوب التي تفوق قدرته الحسابية على الأقل عشرة أضعاف قدرة الحاسوب الكبير المعاصر له بينما تقل قدرة الحاسوب الصغير بمثل ذلك عن الحاسوب الكبير. إن أهم ما يميز الحاسوب العملاق هو وجود أكثر من وحدة حسابية ومنطقية في داخله مرتبطة بأكثر من ذاكرة عشوائية وعند تنفيذ برنامج ما فإن جميع الوحدات الحسابية تعمل على إنجاز العمليات المختلفة من خلال ما يسمى بالمعالجة المتوازية (parallel processing) والمعالجة الإتجاهية (vector processing). ويعود السبب في بناء مثل هذه الحواسيب العملاقة هو الحاجة لسرعات حسابية عالية جدا من قبل الباحثين في كثير من المجالات العلمية كدراسة التفاعلات النووية والتغيرات المناخية وإطلاق المركبات الفضائية. وفي هذه الفترة ظهرت في العالم عدة شركات لتصنيع الحواسيب الصغيرة التي لاقت إقبالا شديدا من قبل قطاع كبير من المستخدمين كالجامعات والشركات والبنوك والمصانع وكان من أكبر هذه الشركات شركة ديك الأمريكية التي باعت ما يزيد عن خمسين ألف حاسوب خلال فترة عشر سنوات. وفي فترة الستينات كان طول كلمة الحواسيب الصغيرة ما بين 8 و 16 بت وسعة ذاكرتها الرئيسية أقل من 64 كيلوبايت ويتراوح سعرها ما بين عشرين ومائة ألف دولار أما الحواسيب الكبيرة فكان طول كلمتها ما بين 16 و 32 بت وسعة ذاكرتها الرئيسية أقل من 250 كيلوبايت ويتراوح سعرها ما بين مائة ألف ومليون دولار وأما الحواسيب العملاقة فكان طول كلمتها 64 بت وسعة ذاكرتها الرئيسية ألف كيلوبايت ويتراوح سعرها ما بين مليون وعشرة ملايين دولار.

وفي السبعينات ظهر الجيل الرابع من الحواسيب التي استخدمت الدوائر المتكاملة ذات النطاق الكبير (ألف ترانزستور) والكبير جدا (عشرة آلاف ترانزستور) مما ساعد على ظهور حواسيب ذات قدرات كبيرة وأحجام صغيرة وبأسعار مقاربة لأسعار الستينات. وشهدت هذه الفترة ظهور نوع جديد من الحواسيب وهي الحواسيب الشخصية أو المنزلية حيث أصبح بإمكان الأفراد الحصول على حاسوب بقدرات متواضعة وبأسعار معقولة. ويعود السبب في ذلك لظهور المعالجات الدقيقة في عام 1971م حين تمكنت شركة إنتل الأمريكية من تصنيع أول معالج دقيق على دائرة متكاملة واحدة تحتوي على 2300 ترانزستور. وفي هذه

الفترة ظهرت سواقات الأقراص الصلبة (Hard Disk Drives) كوسائل تخزين بدلا من الأشرطة المغناطيسية حيث قامت شركة أي بي أم في عام 1973م بتصنيع أول سواقة أقراص صلبة والتي أصبحت وسيلة التخزين الأساسية لأجهزة الحاسوب الشخصية حيث يتم فيها تخزين نظام التشغيل والبرامج الأساسية التي تلزم المستخدم. وفي عام 1978م تم تطوير سواقات الأقراص المرنة (Floppy Disk Drives) والتي استخدمت كوسيلة تخزين ثانوية يمكن من خلالها تحميل البرامج إلى الحاسوب وحفظ البيانات على الأقراص المرنة التي يمكن إدخالها وإخراجها من السواقة وذلك على عكس سواقة الأقراص الصلبة المحكمة الإغلاق. وفي الثمانينات حصل مزيد من التقليص في أحجام الحواسيب بمختلف أنواعها ومزيد من الارتفاع في قدراتها المختلفة وبدأت الحواسيب الشخصية بالانتشار بشكل واسع بعد أن ظهرت أنظمة التشغيل ذات الواجهات الرسومية (graphic interface) التي سهلت التعامل مع الحاسوب من قبل قطاع واسع من المستخدمين. وفي التسعينات ازداد الطلب على الحواسيب لاستخدامها كوسيلة للربط بشبكات المعلومات المختلفة وخاصة شبكة الإنترنت التي استخدمت لتقديم خدمات البريد الإلكتروني وتبادل المعلومات فيما بين المستخدمين والوصول إلى مراكز المعلومات في شتى أنحاء العالم.

3-7 المنطق الرقمي (Digital Logic)

يعود الفضل في ظهور ما يسمى بالمنطق الرقمي إلى العالم الايرلندي جورج بول (George Boole) الذي نشر في عام 1854م مقالة عن التحليل الرياضي للمنطق باستخدام نظام العد الثنائي ولذلك سمي هذا العلم بالجبر أو المنطق البوليني (Boolean algebra or logic). ويستخدم نظام العد الثنائي رقمين اثنين فقط وهما الصفر والواحد أو حالتين وهي حالة الصح (True) وحالة الخطأ (False) ويمكن من خلاله إجراء مختلف العمليات الحسابية والمنطقية بشكل أبسط من أنظمة العد الأخرى وخاصة نظام العد العشري. إن أهم ما يميز هذا النظام هو سهولة بناء آلات حسابية ومنطقية

NOT

x	F(x)
0	1
1	0

BUFFER

x	F(x)
0	0
1	1

AND

xy	F(x)
00	0
01	0
10	0
11	1

NOR

xy	F(x)
00	1
01	0
10	0
11	0

OR

xy	F(x)
00	0
01	1
10	1
11	1

XOR

xy	F(x)
00	0
01	1
10	1
11	0

NAND

xy	F(x)
00	1
01	1
10	1
11	0

XNOR

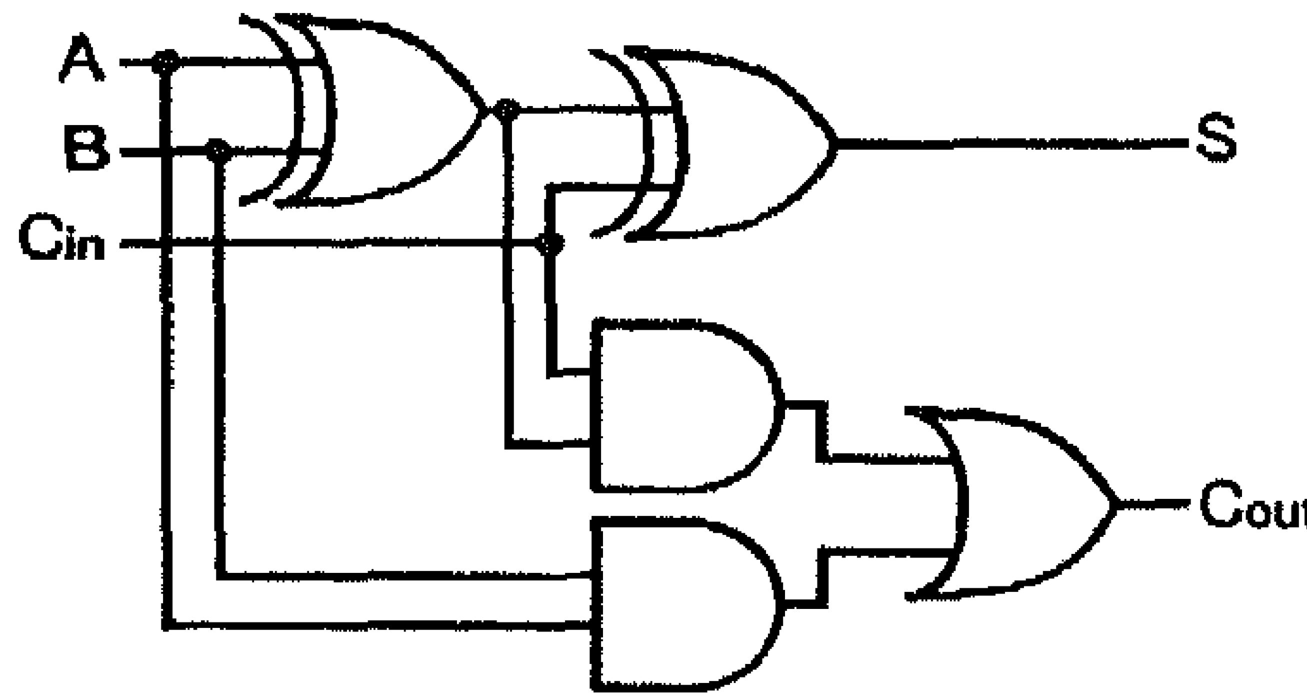
xy	F(x)
00	1
01	0
10	0
11	1

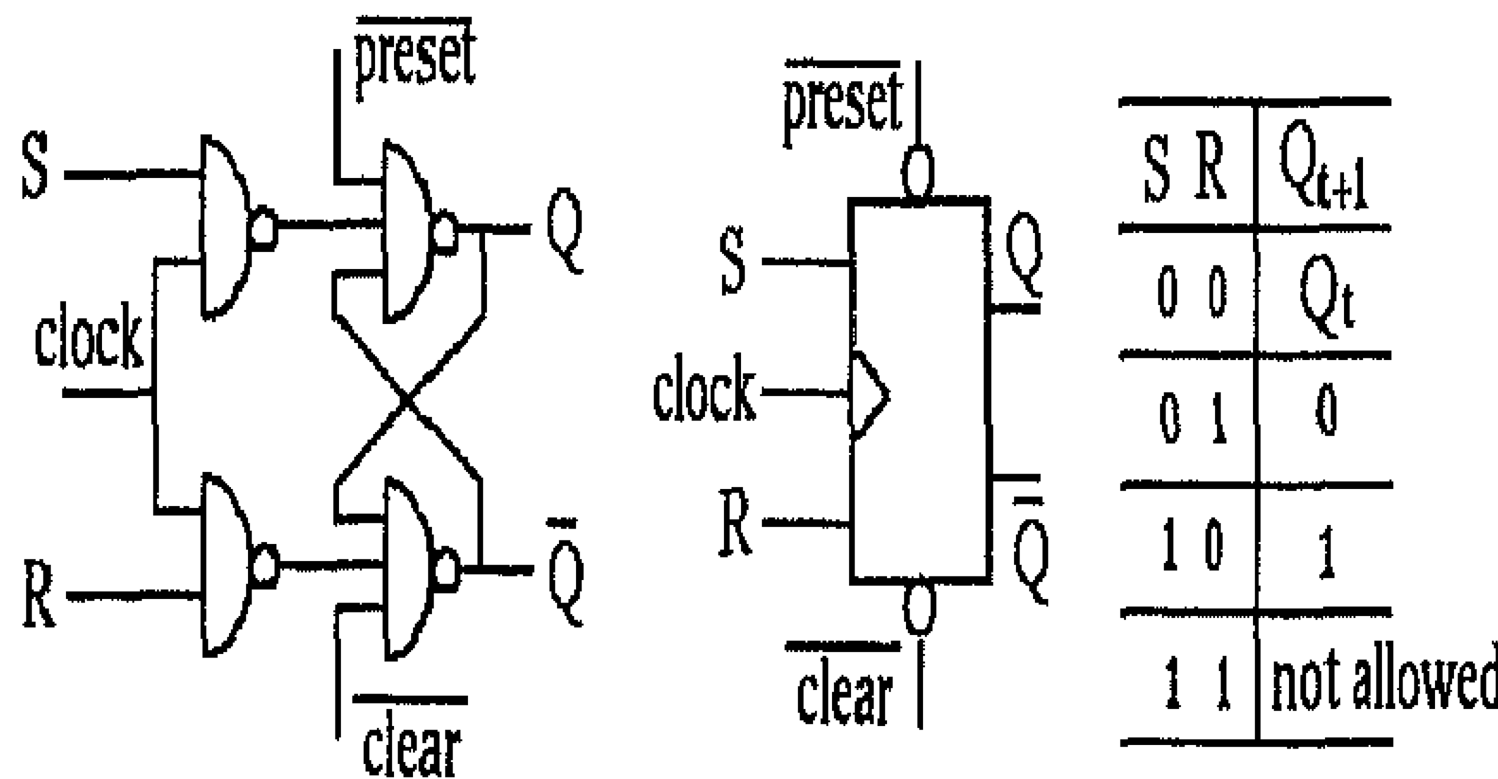
تستخدم مفاتيح بسيطة يتم من خلالها تمثيل الرقم واحد بإغلاق المفتاح بينما يمثل فتحه الرقم صفر أو العكس ويمكن من خلال توصيل عدة مفاتيح على التوالي أو التوازي أن نحصل على عمليات منطقية مختلفة. وأما الميزة الأخرى فتكمن في سهولة تخزين الأرقام الثنائية فترك المفتاح مغلقا يعني تخزين الرقم واحد بينما تركه مفتوحا يعني تخزين الرقم صفر. وفي عام 1903م تمكن اليوغسلافي نيكولا تسلا (Nikola Tesla) من الحصول على براءة اختراع لدائرة منطقية كهربائية أطلق عليها اسم البوابة (gate) وذلك من خلال استخدام مفاتيح كهربائية بدلا من المفاتيح الميكانيكية حيث تتميز المفاتيح الكهربائية بصغر حجمها وبسرعة فتحها وإغلاقها باستخدام الإشارات الكهربائية.

ومع اختراع الصمامات الإلكترونية في عام 1906م والترانزستورات في عام 1947م أصبح بالإمكان تصنيع مفاتيح إلكترونية صغيرة الحجم بالمقارنة مع المفاتيح الكهروميكانيكية التي كانت تستخدم

المرحلات الكهربائية التي تقوم بفتح وإغلاق المفاتيح الميكانيكية. يوجد أربع أنواع من العمليات المنطقية الأساسية وهي عملية "لا" (NOT operation) وعملية "و" (AND operation) وعملية "أو" (OR operation) وعملية "أو المستثناة" (XOR operation). فالبوابة المنطقية التي تقوم بعملية "لا" تسمى العاكس (inverter) ولها مدخل واحد ومخرج واحد بحيث تكون حالة المخرج عكس حالة المدخل. والبوابة المنطقية التي تقوم بعملية "و" تسمى بوابة "و" (AND gate) ولها أكثر من مدخل ومخرج واحد بحيث تكون حالة المخرج في حالة الصح فقط إذا كانت حالة جميع المداخل صحيحة. والبوابة المنطقية التي تقوم بعملية "أو" تسمى بوابة "أو" (OR gate) ولها أكثر من مدخل ومخرج واحد بحيث تكون حالة المخرج في حالة الصح فقط إذا كانت حالة واحد أو أكثر من المداخل صحيحة. والبوابة المنطقية التي تقوم بعملية "أو الحصرية" تسمى بوابة "أو الحصرية" (XOR gate) ولها أكثر من مدخل ومخرج واحد بحيث تكون حالة المخرج في حالة الصح (True) فقط إذا لم تكن حالة جميع المداخل صحيحة أو جميعها خاطئة. وعلى الرغم من العدد القليل للعمليات المنطقية الأساسية إلا أنه يمكن من خلالها بناء أعداد كثيرة من العمليات المنطقية غير الأساسية يعبر عنها في العادة بما يسمى بجدول الحقيقة (Truth Table).

ويمكن باستخدام نظام العد الثنائي القيام بجميع العمليات الرياضية التي يقوم بها نظام العد العشري كجمع الأرقام وطرحها وضربها وتقسيمها ومقارنتها ولكن بميزة كبرى وهي إمكانية استخدام البوابات المنطقية البسيطة للقيام بإجراء مثل هذه العمليات بينما نجد من الصعب جدا بناء دوائر منطقية تتعامل مع الأرقام العشرية. فعلى سبيل المثال فإن عملية جمع خانة واحدة لرقمين ثنائيين مع الرقم المحمول من الخانة السابقة يحتاج إلى خمس بوابات منطقية من أنواع مختلفة كما هو مبين بالشكل المرفق. وإلى جانب العمليات المنطقية والحسابية فإن الحواسيب تحتاج لوسائل لتخزين المعلومات لفترات زمنية قصيرة أو طويلة وذلك لكي تتمكن من إجراء العمليات الحسابية والمنطقية عليها. ولقد تم في الثلاثينات اختراع ما يسمى بالنطاطات (Flip-Flops FF) وهي دوائر كهربائية مكونة من بوابات منطقية تستخدم التغذية الخلفية (feedback) لتخزين الرقم واحد أو الرقم صفر. ويوجد أنواع كثيرة من النطاطات كنطاطات (RS) و (JK) و (D) و (T). وتستخدم هذه النطاطات لبناء أنواع مختلفة من الدوائر الرقمية المهمة بعضها لأغراض التخزين كالمسجلات (registers) والذاكرات (memories) وبعضها لأغراض العد والتوقيت كالعدادات (counters). وتحتاج الحواسيب كذلك دوائر رقمية إلكترونية مهمة تستخدم للتحكم في توقيت إجراء العمليات المنطقية وتحديد المسارات التي تتبعها الإشارات الرقمية خلال انتقالها بين مراحل المعالجة





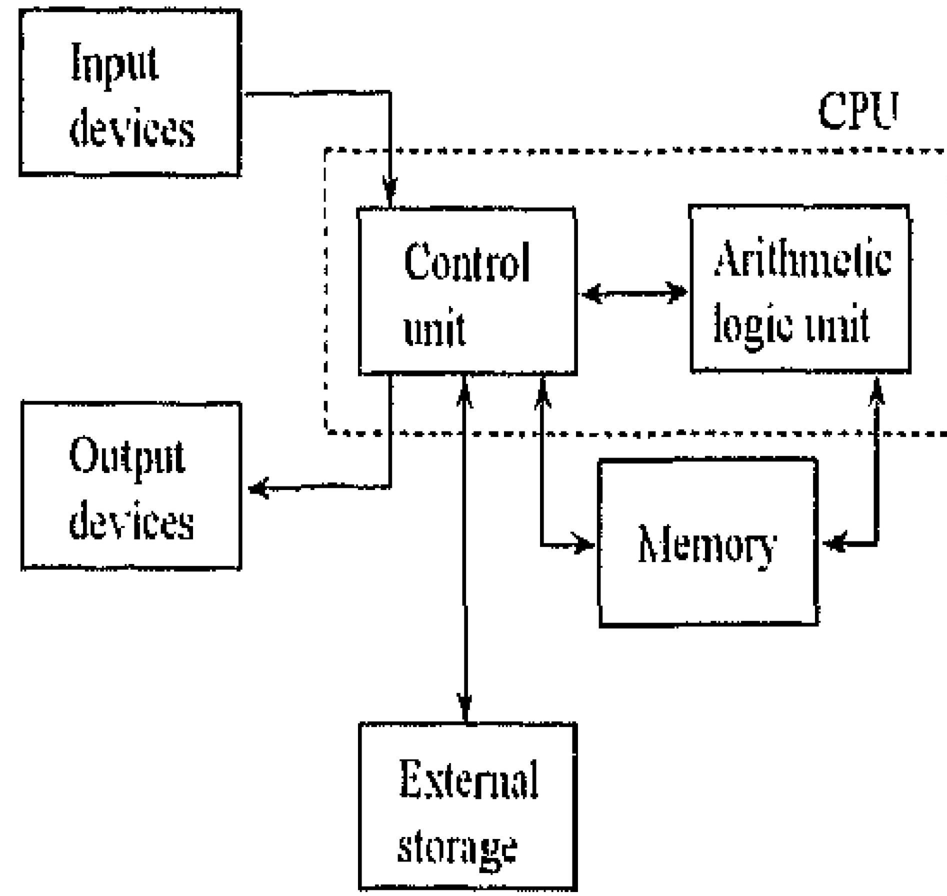
S R	Q_{t+1}
0 0	Q_t
0 1	0
1 0	1
1 1	not allowed

المختلفة كالساعات (clocks) والمؤقتـات (timers) بأنواعهـا المختلفـة والمهتـزات أحاديـة الاسـتقرار (monostable multivibrators).

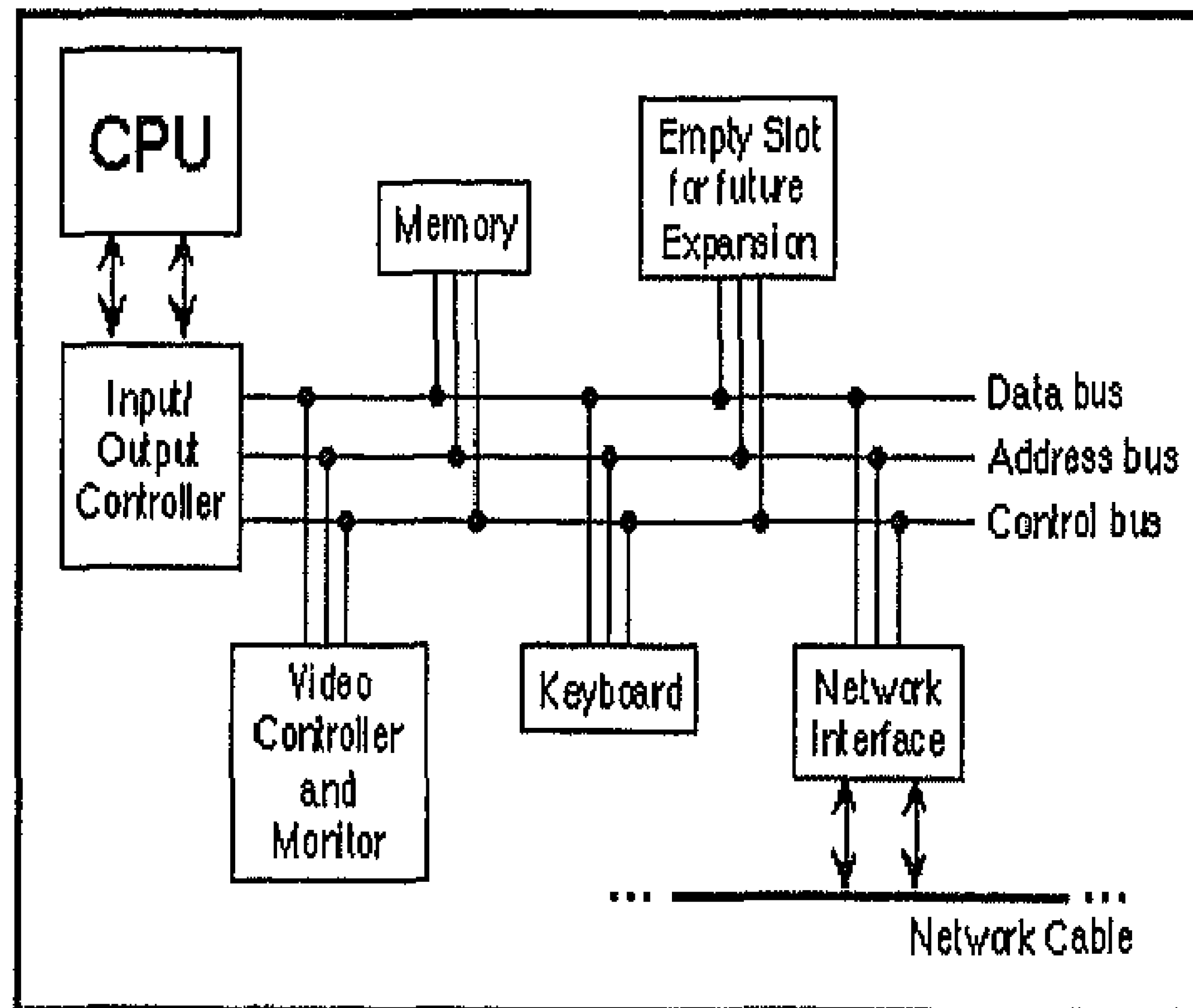
وعلى الرغم من أن الدوائر المنطقية الأساسية التي يحتاجها الحاسوب لبنائه لم تتغير منـذ ظهـور الحاسوب في نهاية الأربعينات إلا أن العمل على تطوير صناعة هذه الدوائر البسـيطة لـم يتوقـف خـلال الخمسين سنة الماضية حيث أن أحجام الحواسيب وقدراتها المختلفة وكذلك كميـة الطاقـة الكهربائيـة التـي تستهلكها تعتمد بشكل أساسي على طرق تصنيع هذه الدوائر. ويعالج علم الإلكترونيـات الرقميـة التقنيـات المختلفة التي يتم بها تصنيع مختلف أنواع الترانزستورات وطرق توصيلها مـع بقيـة القطـع الإلكترونيـة كالمقاومات والثنائيات والمكثفات لبناء الدوائر المنطقية. ويضع مهندس الإلكترونيات نصب عينيه وهو يقـوم بتصميم الدوائر الرقمية أن تكون المساحة التي تحتلها هذه الدوائر المنطقية على رقاقات السيليكون والطاقـة التي تستهلكها والزمن اللازم لفتحها وإغلاقها أقل ما يمكن لكي نحصل على حواسيب صغيرة الحجم وسريعة وتستهلك أقل قدر من الطاقة الكهربائية. ولذلك ظهر في الأسواق عشـرات الأنـواع مـن الترانزسـتورات وعشرات العائلات المنطقية التي تعتمد على طرق توصيل هذه الترانزستورات ببعضها البعض والتي تتفاوت تفاوتا كبيرا في المساحة التي تحتلها على الرقاقات والطاقة الكهربائية التي تستهلكها والسرعة التي يـتم بهـا فتح وإغلاق الترانزستورات. وغالبا ما يترك الأمر لمصممي الحواسيب لاختيار التقنيـة المناسـبة لتصـنيع وحدات الحاسوب المختلفة حسب المواصفات المطلوبة فالتقنية المستخدمة في صناعة وحدة الحساب والمنطق غير تلك المستخدمة في صناعة الذاكرة أو وحدات الإدخال والإخراج. ففي عـام 1963م ظهـرت العائلـة المنطقية الشهيرة المسماة منطق الترانزستور- الترانزسـتور ((Transistor-Transistor Logic (TTL) حيث تغلبت على المشاكل التي كانت تعاني منها العائلات التي سبقتها ولا زالت من أهم العـائلات المنطقيـة المستخدمة إلى يومنا هذا. وفي نهاية الستينات ظهرت عائلتان جديـدتان وهمـا عائلـة منطـق البواعـث المقترنة((Emitter-Coupled Logic (ECL) وعائلة منطق الحقـن المتكامـل (Integrated Injection Logic(I^2L) واللتان تتميزان بأعلى سرعة تبديل ممكنة من بين جميع العـائلات المنطقيـة إلا أنهمـا فـي المقابل تستهلكان كميات عالية من الطاقة ولذلك فقد اقتصر استخدامهما في التطبيقات التي تحتـاج لسـرعات تبديل عالية جدا. أما التقنية الثانية فهي تقنية الترانزستور أحادي القطبية والتـي ظهـرت فـي عـام 1968م وتمتاز هذه التقنية بسهولة تصنيعها وقلة استهلاكها للطاقة وارتفاع عدد الترانزستورات المصنعة على وحـدة المساحة ولكن سرعة التبديل فيها أقل من تلك التي في تقنية الترانزستور ثنائي القطبية. وتستخدم هذه التقنيـة في جميع أنواع الدوائر المتكاملة وخاصة ذات النطاق الكبير جدا (VLSI) وما فوقها والتـي تتناسـب مـع صناعة المعالجات الدقيقة وذاكرات الحاسوب. وتشتمل هذه التقنية على ثلاث عائلات وهي عائلة ترانزستور معدن-اكسيد- شبه موصل – موجب القنـاة P-channel Semiconductor Field-Effect Transistor (PMOSFET)) وعائلـة ترانزسـتور معـدن-اكسـيد- شـبه موصـل – سـالب القنـاة N-channel Semiconductor Field-Effect Transistor (NMOSFET)) وعائلة ترانزستور معدن-اكسيد- شـبه موصـل -مكمـل (Complementary Semiconductor Field-Effect Transistor (CMOSFET). وفي بداية التسعينات ظهرت تقنية جديدة تجمع بين ميزات تقنية الترانزستور ثنائي القطبية ذات سرعة التبديل العالية وتقنية الترانزستور أحادي القطبية ذات كثافة التكامل العالية بعد أن أصبح بالإمكـان تصـنيع نـوعي الترانزستور على نفس شريحة السيليكون ولقد تم استخدام هذه التقنية المسـماة (BiCMOS) فـي تصـنيع المعالجات الدقيقة ذات السرعات العالية.

4-7 معمارية الحاسوب (Computer Architecture)

يتكون الحاسوب من أربع وحدات رئيسية فالوحدة الأولى هي وحدة المعالجة المركزية (Central Processing Unit CPU) والتي تتكون بدورها من وحدة الحساب والمنطق (Arithmetic & Logic Unit ALU) لإجراء مختلف العمليات الحسابية والمنطقية ووحدة التحكم (control unit) التي تقوم بجلب التعليمات من الذاكرة الرئيسية ثم تحولها إلى إشارات تحكم كهربائية يتم نقلها إلى جميع الوحدات لضبط توقيت إجراء العمليات فيها والمسجلات (registers) وهي نوع من الذاكرات التي تقوم بتخزين النتائج الآنية التي تنجزها وحدة الحساب والمنطق. وأما الوحدة الثانية فهي وحدة الذاكرة (memory) والتي تشمل الذاكرة الرئيسية التي يتم فيها تخزين البرامج المراد تنفيذها والبيانات المراد معالجتها والذاكرة الثانوية وهي وحدة تخزين دائمة تستخدم لتخزين البرامج والبرمجيات والبيانات بشكل دائم لحين الحاجة إليها كالأقراص الصلبة والمرنة والمدمجة. وأما الوحدة الثالثة فهي وحدة الإدخال (input unit) والتي يتم من خلالها إدخال البرامج والبيانات ومختلف أنواع المعلومات إلى ذاكرة الحاسوب الرئيسية كلوحة المفاتيح والفأرة وعصا التحكم والقلم الضوئي والماسح الضوئي. وأما الوحدة الرابعة فهي وحدة الإخراج (output unit) والتي يتم من خلالها إخراج مختلف أنواع المعلومات من الحاسوب إلى العالم الخارجي كشاشات العرض والطابعات والراسمات والسماعات.

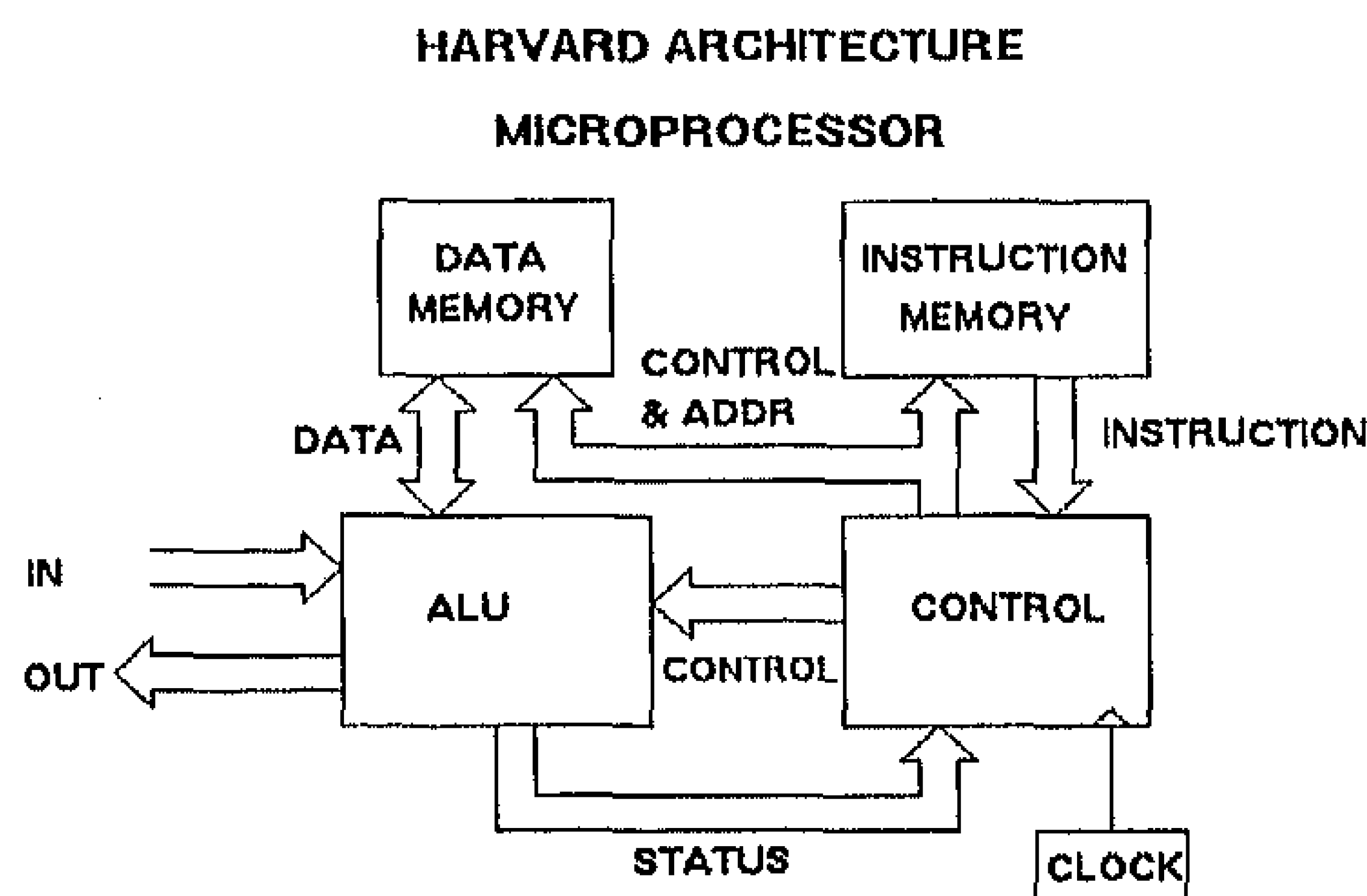


ويتم ربط هذه الوحدات مع بعضها البعض في داخل الحاسوب باستخدام ثلاث أنواع من الناقلات (Bus) وهي ناقل العناوين (address bus) الذي يقوم بتحديد عنوان الذاكرة أو عنوان وحدة الإدخال والإخراج التي سيتم إرسال أو استقبال البيانات منها وناقل البيانات (data bus) الذي يقوم بنقل البيانات فيما بين الوحدات المختلفة وناقل التحكم (control bus) الذي يقوم بنقل إشارات التحكم من وحدة التحكم إلى بقية الوحدات. ويتكون كل من ناقل العناوين وناقل البيانات من عدد من خطوط النقل المتوازية حيث يحدد عدد هذه الخطوط قدرات الحاسوب المختلفة فزيادة عدد خطوط ناقل العناوين يزيد من سعة الذاكرة الرئيسية التي يمكن لوحدة المعالجة المركزية التعامل معها فعلى سبيل المثال فإن سعة الذاكرة الرئيسية لا تتجاوز 64 كيلوبايت إذا كان عرض ناقل العناوين 16 خط وترتفع هذه السعة إلى ما يزيد عن أربع ملايين كيلوبايت باستخدام 32 خط. أما عدد خطوط ناقل البيانات فيحدد طول كلمة البيانات التي يمكن معالجتها دفعة واحدة في وحدة المعالجة المركزية فكلما زاد طول هذه الكلمة كلما زادت كمية المعلومات المعالجة. وفي الأنواع الأولى من الحواسيب كان يتم استخدام ناقل البيانات



لنقل الأوامر (instructions) التي تخزن جنبا إلى جنب مع البيانات في نفس الذاكرة ويسمى مثل هذا النوع من معمارية الحاسوب بمعمارية فون نيومان (John Von Neumann architecture) نسبة إلي العالم جون فون نيومان مخترع الحاسوب الحديث. ويوجد الآن نوع آخر من المعمارية وهي معمارية هارفارد (Harvard architecture) نسبة إلى جامعة هارفارد التي تم فيها تطوير هذه المعمارية وقد تم فيها فصل ناقل الأوامر عن ناقل البيانات. وقد طور العلماء أنواع أخرى من المعماريات وذلك لزيادة سرعة إجراء الحسابات منها الحاسوب ذو مجموعة الأوامر المركبة (Complex Instruction Set Computer CISC) والحاسوب ذو مجموعة الأوامر المصغرة (Reduced Instruction Set Computer RISC) وذلك للتناسب مع متطلبات أنواع الحواسيب المختلفة كالمعالجات والمتحكمات الدقيقة والحواسيب الشخصية والكبيرة والعملاقة.

وتعتمد سرعة الحاسوب في إجراء العمليات الحسابية والمنطقية على عدة عوامل أولها الزمن الذي تستغرقه وحدة الحساب والمنطق في إنجاز العمليات المختلفة والتي تعتمد بدورها على طول كلمة البيانات والهيكلية الداخلية لهذه الوحدة وكذلك التقنية الإلكترونية المستخدمة في صناعتها وثانيها الزمن الذي يستغرقه نقل التعليمات والبيانات فيما بين الوحدة المركزية ووحدة الذاكرة الرئيسية. وغالبا ما يتم إجمال هذه العوامل بعامل واحد وهو سرعة ساعة الحاسوب (clock speed) حيث تقوم هذه الساعة بتوليد نبضات كهربائية بمعدل يتم تحديده بناءا على العوامل آنفة الذكر وتعمل هذه النبضات على تشغيل المؤقتات الموجودة في وحدة التحكم والتي تقوم بضبط سير العمليات في مختلف أجزاء الحاسوب. وعلى الرغم من أن جميع أجيال الحاسوب تتكون تقريبا من نفس الوحدات إلا أن هنالك فروقا شاسعة في التقنية المستخدمة في بناء هذه الوحدات. ففي بداية ظهور الحواسيب كانت التقنية المستخدمة في صناعة هذه الوحدات في غاية البساطة فوحدة المعالجة المركزية تم تصنيعها في الأربعينات باستخدام الصمامات الإلكترونية التي يبلغ حجم الواحد منها حجم الإصبع وفي الخمسينات تم استبدالها بالترانزستورات التي يبلغ حجم الواحد منها حجم حبة الحمص. ومنذ بداية الستينات تم التحول إلى استخدام الدوائر المتكاملة التي يبلغ حجم الواحدة منها حجم إبهام اليد إلا أن عدد الترانزستورات التي تحتويها كان يتضاعف كل عامين تقريبا حيث بدأ بعشرة ترانزستورات في بداية الستينات ووصل إلى ما يزيد عن عشرة ملايين ترانزستور في نهاية التسعينات. وقد أدى هذا إلى تقليص كبير في أحجام الحواسيب حيث كان الحاسوب يحتل عدة غرف في الأربعينات والخمسينات فأصبح اليوم يوضع فوق طاولة صغيرة أو بحجم الكتاب في حالة الحواسيب المحمولة.



أما الذاكرة الرئيسية والتي يتم فيها تخزين البرامج المراد تنفيذها والبيانات المراد معالجتها فيجب أن تكون من النوع الذي يمكن الوصول إلى أي من خلايا التخزين فيها مباشرة دون المرور على بقية الخلايا أو ما يسمى بذاكرة الوصول العشوائي (Random Access Memory (RAM)). وكان توفير مثل هذه الذاكرة من أصعب المشاكل التي واجهها مطوري الحواسيب ففي الأربعينات تم استخدام خطوط التأخير الزئبقية وشاشات أنابيب الأشعة المهبطية كذاكرات عشوائية إلا أنها كانت معقدة وغير عملية ولا يزيد حجم

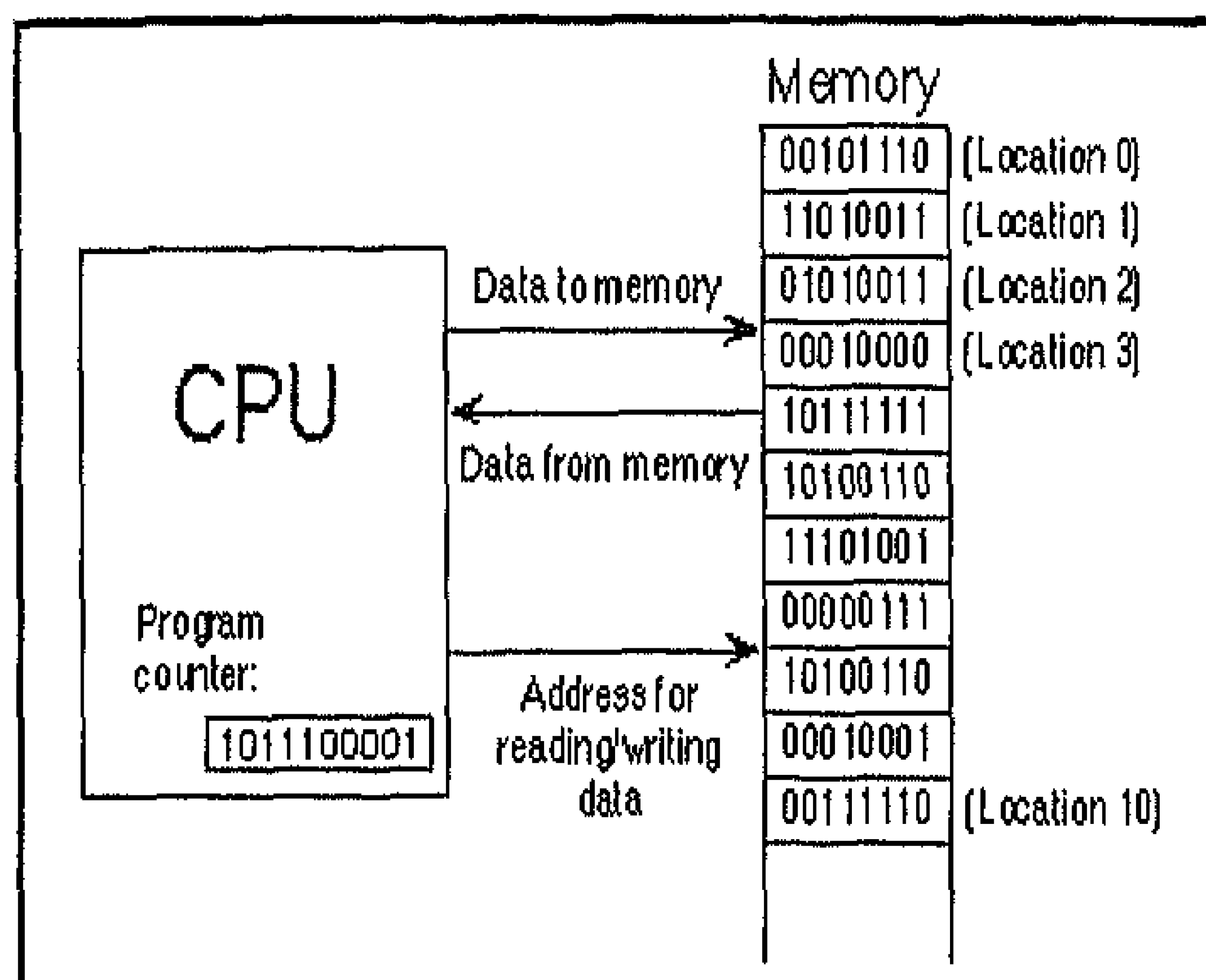
ذاكرتها عن بضع مئات من الكلمات. وفي الخمسينات والستينات تم استخدام ذاكرة القلوب المغناطيسية كذاكرة عشوائية ولكن على الرغم من نجاح هذه التقنية إلا أن كبر حجم الخلية المكون من حلقة مغناطيسية يحيط بها ملفان كهربائيان حال دون تصنيع ذاكرات عشوائية ذات سعة تخزينية كبيرة. وفي السبعينات بدأ التحول لاستخدام الذاكرات الإلكترونية المصنعة من المواد شبه الموصلة والتي تتميز بصغر حجمها وارتفاع سرعة الوصول فيها وقد تم تصنيع ذاكرات بمئات الملايين من الكلمات على دائرة متكاملة واحدة. أما وحدات التخزين المساعدة والتي تلزم لتخزين البرامج والبيانات التي يتكرر استخدامها من قبل الحاسوب والتي يراد حفظها لفترات طويلة لحين الحاجة إليها فيجب أن تتميز بإمكانية الكتابة عليها والقراءة منها بشكل متكرر. ففي الخمسينات تم استخدام الأشرطة المغناطيسية والتي يمكنها تخزين كميات كبيرة من المعلومات إلا أن عيبها يكمن في بطئها الشديد حيث أن الوصول للمعلومات فيها يتم بشكل متسلسل وليس بشكل عشوائي. وقد تم في الستينات استخدام الاسطوانات المغناطيسية وهي اسطوانات ذات أقطار كبيرة ويوجد على سطحها عدد كبير من الأشرطة المغناطيسية المتوازية ويمكن تحريك الرأس من شريط إلى شريط لتسريع عملية الوصول للمعلومات. وفي السبعينات تم استخدام سواقات الأقراص المغناطيسية الصلبة واللينة وهي نفس فكرة الاسطوانات المغناطيسية إلا أن المسارات المغناطيسية موجودة على سطح القرص المطلي بالمادة المغناطيسية. وفي الثمانينات تم استخدام سواقات الأقراص الضوئية حيث يتم تخزين المعلومات على سطح قرص مصنوع من مواد عازلة يمكن التحكم بمقدار انعكاسيتها للضوء من خلال تسليط ضوء الليزر عليها.

أما وحدات الإدخال فقد تم في الأربعينات استخدام المفاتيح والأزرار لبرمجة الحاسوب واستخدام البطاقات والأشرطة الورقية المثقبة لإدخال البيانات وفي الخمسينات والستينات استمر استخدام هذه البطاقات والأشرطة لإدخال البرامج والبيانات إلى الحاسوب. وفي السبعينات بدأ استخدام لوحات المفاتيح (keyboards) كوحدات إدخال مع استخدام الشاشات لمشاهدة ما يكتب من خلال هذه اللوحات وفي الثمانينات تم استخدام الفأرة (mouse) كوحدة لإدخال المعلومات من خلال تحريك الفأرة والتأشير على الرسومات الموجودة على الشاشة ومن ثم النقر على مفاتيح الفأرة لتنفيذ الأوامر. وفي التسعينات ظهرت وحدات إدخال ما يسمى بالوسائط المتعددة مثل الميكرفون لإدخال الإشارات الصوتية والكاميرة لإدخال الصور المتحركة والماسحات الضوئية لإدخال الرسوم والصور الثابتة. وأما وحدات الإخراج فقد تم في الأربعينات استخدام البطاقات والأشرطة المثقبة ثم تحولت في الخمسينات للطابعات الكهربائية والتي أصبحت وسيلة الإخراج الرئيسية إلى يومنا هذا. وفي الستينات تم استخدام الراسمات لإخراج الرسومات الخطية وفي السبعينات تم استخدام الشاشات كوسيلة لقراءة المعلومات المكتوبة والتي تطورت في الثمانينات لمشاهدة المعلومات المكتوبة والمرسومة والمصورة وفي الثمانينات تم استخدام السماعات لإخراج الإشارات الصوتية.

5-7 لغات البرمجة وأنظمة التشغيل (Programming Languages & Operating Systems)

إن اللغة الوحيدة التي يمكن لوحدات الحاسوب المختلفة أن تتخاطب بها هي ما يسمى بلغة الآلة (machine language) وهي عبارة عن شيفرات مكونة من سلسلة من الأرقام الثنائية وهي الصفر والواحد. وكان المختصون في أول عهد الحاسوب يستخدمون لغة الآلة لكتابة برامجه المختلفة وكانت تتطلب وقتا طويلا وتركيزا عاليا لتجنب الوقوع في الأخطاء التي كان من السهل ارتكابها بسبب التعامل مع سلاسل

طويلة من الآحاد والأصفار. وفي عام 1952م تم وضع أول لغة رمزية لكتابة برامج الحاسوب سميت لغة التجميع (assembly language) حيث تم تمثيل تعليمات وأوامر الحاسوب برموز كتابية يمكن للمبرمج تذكر معانيها فيسهل عليه متابعة ما يكتب ومن ثم يتم ترجمة لغة التجميع هذه إلى لغة الآلة التي يتم تحميلها إلى ذاكرة الحاسوب وكانت الترجمة تتم بشكل يدوي في بادئ الأمر إلى أن تم تطوير المترجمات الآلية (assemblers) التي يقوم الحاسوب بنفسه بعبء هذه العملية. وعلى الرغم من التسهيل الكبير الذي أحدثته لغة التجميع في كتابة برامج الحاسوب إلا أن برمجتها لا يحسنها في الغالب إلا المختصون في الحاسوب. ومع تزايد الطلب على استخدام الحاسوب في مختلف المجالات والتخصصات فقد باتت الحاجة ماسة لاستحداث لغات برمجة عليا تكون مفرداتها قريبة من مفردات اللغة الإنكليزية أو غيرها من اللغات يسهل على هؤلاء المستخدمين كتابة برامجهم بها. ويشترط على هذه اللغة العليا أن لا تعتمد على نوع الحاسوب المستخدم بل يترك الأمر للمختصين لكتابة المترجمات والمفسرات والمجمعات (compilers& interpreters) اللازمة لتحويل هذه اللغة العليا إلى لغة الآلة والتي غالبا ما تعتمد على هيكلية الحاسوب المستخدم. وفي عام 1957م ظهرت أول لغة برمجة ذات مستوى عال وهي لغة فورتران (Fortran) والتي صممت خصيصا لتناسب التطبيقات العلمية والهندسية تلتها لغة آلقول (Algol) التي ظهرت في عام 1958م ثم لغة كوبل (Cobol) التي ظهرت في عام 1959م وصممت لتتناسب مع التطبيقات التجارية. وفي الستينات ظهر فوج جديد من لغات البرمجة صممت لتتناسب مع أنواع جديدة من التطبيقات كان أهمها لغة باسكال (Pascal) ولغة بيسك (Basic) التي شاع استخدامها في الثمانينات كلغة برمجة للحواسيب المنزلية. وفي عام 1972م تم تطوير لغة سي (C language) في مختبرات بل الأمريكية وهي لغة لها قدرة عالية على استغلال موارد الحاسوب المختلفة وهي أقرب ما تكون للغة التجميع ولذلك تم استخدامها في تطوير كثير من البرمجيات وخاصة أنظمة التشغيل.



أما أنظمة تشغيل الحاسوب ((Operating System (OS)) فقد أصبحت الحاجة ماسة إليها بعد انتشار الحواسيب في مختلف الميادين واستخدامها من قبل الكثير من غير المختصين حيث بدأ العمل على كتابة برامج تعمل على تسهيل التعامل مع الحاسوب من قبل مختلف المستويات التعليمية. ويقوم نظام التشغيل باستلام أوامر بسيطة من قبل المستخدم ثم يتولى الحاسوب تنفيذ هذه الأوامر من خلال برامج يحتويها نظام التشغيل كفتح الملفات وتخزينها وتشغيل البرامج والتحكم بوحدات الإدخال والإخراج. وقد ظهر في الخمسينات والستينات بعض أنظمة التشغيل البسيطة ولكن ومع زيادة قدرات الحواسيب وزيادة أنواع وحدات الإدخال والإخراج بدأت الحاجة لأنظمة تشغيل متقدمة. ففي بداية السبعينات تم تطوير نظام التشغيل المشهور المسمى يونكس (Unix) والذي أصبح فيما بعد أشهر أنظمة التشغيل التي يمكنها العمل على مختلف أنواع الحواسيب بغض النظر عن هيكليتها. وفي الثمانينات ظهر نظام التشغيل المسمى دوس (DOS) والذي انتشر استخدامه في الحواسيب المنزلية والشخصية وبقي الدوس نظام التشغيل المفضل في معظم الحواسيب الشخصية إلى أن ظهرت أنظمة التشغيل ذات الواجهات الرسومية متعددة المهام. ومن أشهر هذه الأنظمة نظام الويندوز (Windows) الذي ظهر في منتصف الثمانينات والذي يتميز على نظام الدوس بعدم حاجة

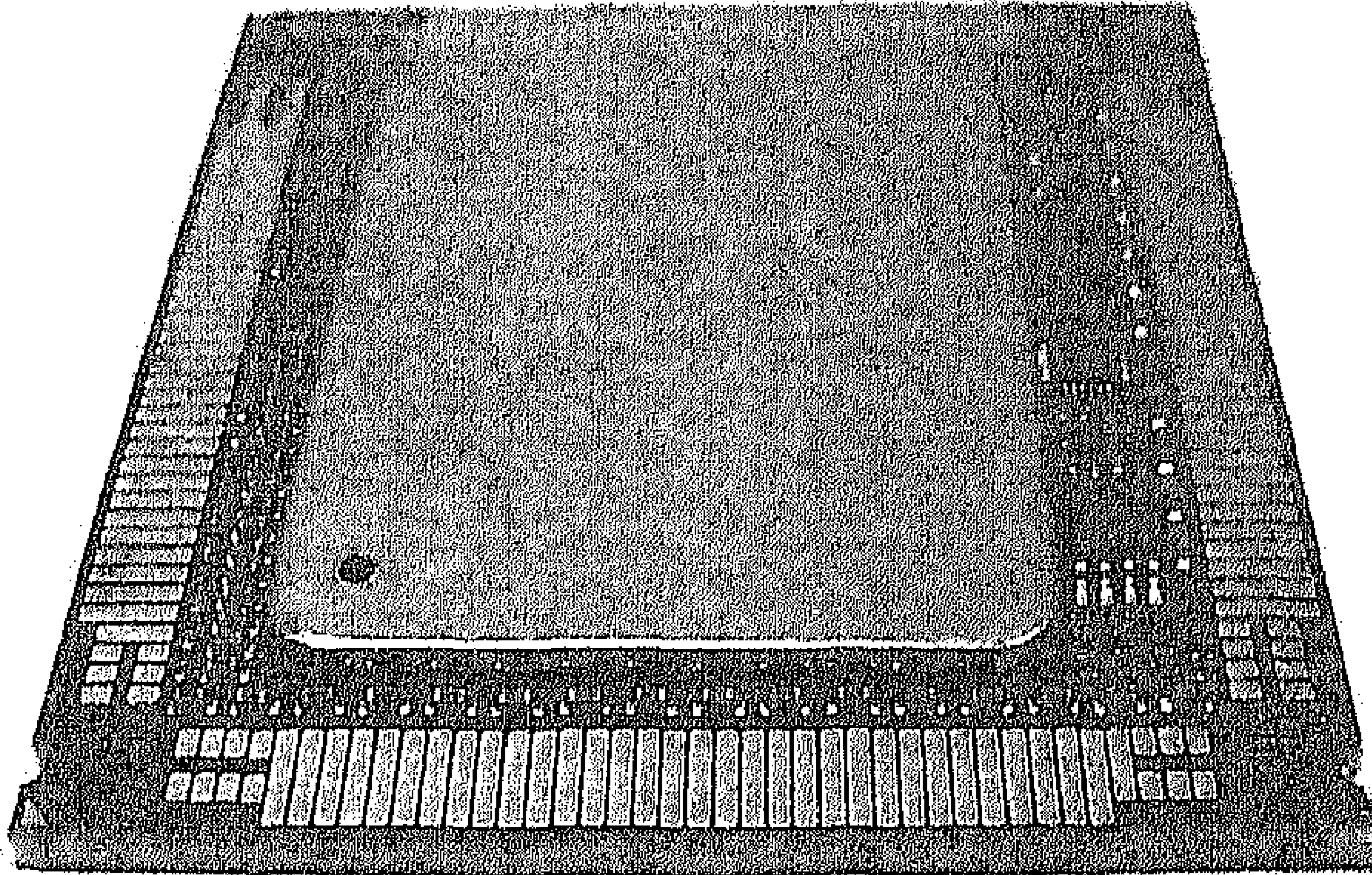
المستخدم لتذكر وكتابة أوامر التشغيل باستخدام لوحة المفاتيح بل أصبحت تتم من خلال النقر على مفاتيح الفأرة التي أصبحت وسيلة الإدخال المفضلة لدى المستخدمين حتى الأطفال منهم. ولم يقتصر الأمر على تطوير لغات البرمجة وأنظمة التشغيل بل تعداها إلى تطوير برمجيات سهلت على غير المختصين استغلال قدرات الحاسوب في مختلف التطبيقات مثل برامج معالجة النصوص ومعالجة الرسوم والصور وبرامج المحاسبة والمستودعات وقواعد البيانات والبيانات المجدولة وبرامج الألعاب. وبظهور لغات البرمجة المختلفة وأنظمة التشغيل ظهر في الستينات علم جديد مهمته العمل على تطوير البرمجيات التي تستغل بالشكل الأمثل إمكانيات الحاسوب المتاحة إلى جانب العمل على جعل البرمجيات سهلة الاستخدام من قبل مختلف المستخدمين بغض النظر عن خلفياتهم العلمية. وقد سمي هذا العلم بعلم الحاسوب (computer science) والذي يختلف عن علم هندسة الحاسوب (computer engineering) الذي يتعامل مع تصميم وتصنيع الحواسيب وكتابة لغات الآلة الخاصة بها والعمل كذلك على رفع قدرات الحواسيب من خلال متابعة واستغلال التطور الحاصل في التقنيات الحديثة مثل تقنيات الإلكترونيات الدقيقة والإلكترونيات الضوئية وأنظمة الاتصالات السلكية واللاسلكية.

6-7 المعالجات والمتحكمات الدقيقة (Microprocessors & Microcontrollers)

يعرف المعالج الدقيق على أنه وحدة معالجة مركزية بكامل وحداتها وهي وحدة التحكم ووحدة الحساب والمنطق والمسجلات يتم دمجها على رقاقة مصنوعة من السليكون لا تتجاوز أبعادها عدة سنتيمترات مربعة. ويمكن من خلال إضافة ذاكرة رئيسية وبعض مشغلات وحدات الإدخال والإخراج تحويل المعالج الدقيق إلى جهاز حاسوب أو جهاز تحكم ذكي. وقد راج استخدام المعالج الدقيق في غضون سنوات قليلة في صناعة الحواسيب الشخصية وفي صناعة أجهزة التحكم لكثير من الأجهزة الكهربائية كالتلفزيونات والمسجلات الصوتية والمرئية وأجهزة الهواتف اللاسلكية والخلوية والمعدات والأجهزة الصناعية وفي خطوط إنتاج مختلف أنواع السلع. لقد كان الهدف من تطوير المعالجات الدقيقة في بداية الأمر هو لاستخدامها في تصنيع الحاسبات اليدوية التي أصبحت الحاجة ماسة إليها من قبل كثير من المستخدمين كالمهندسين وطلبة الجامعات الذين كانوا يستخدمون المساطر المنزلقة لإجراء حساباتهم. وعلى الرغم من أن بعض الشركات قد تمكنت في الستينات من تصنيع بعض الحاسبات اليدوية القادرة على إجراء العمليات الحسابية البسيطة إلا أن الحاجة لا زالت قائمة لآلات حاسبة قادرة على إجراء العمليات الحسابية والرياضية أو ما أطلق عليها بالحاسبات العلمية. وفي عام 1971م تمكنت شركة إنتل الأمريكية من تصنيع أول معالج دقيق على دائرة متكاملة واحدة (4004) لحساب شركة يابانية لتصنيع الحاسبات باستخدام 2300 ترانزستور بتقنية (PMOS) بعرض شريط 10 ميكروميتر وكان عرض الناقل أربع بتات يستخدم للبيانات والعناوين بالتعاقب وسرعته تزيد قليلا عن مائة ألف هيرتز وثمنه مائتي دولار. وفي عام 1974م طورت إنتل المعالج دقيق (8080) بتقنية (NMOS) بعرض شريط 6 ميكروميتر وبعرض ناقل ثمان بتات للبيانات و 16 بت للعناوين وبسرعة ألف كيلوهيرتز ويحتوي على 6000 ترانزستور. وفي المنتصف الثاني من السبعينات تمكنت كثير من الشركات الأمريكية والأوروبية واليابانية من تصنيع مئات الأنواع من المعالجات الدقيقة ذات الثمان بتات للبيانات وبسرعات لا تتجاوز الواحد ميغاهيرتز وكان من أشهرها معالجات شركة موتورولا.

وقد أدى التنافس الشديد بين هذه الشركات إلى انخفاض أسعار المعالجات من عدة مئات من الدولارات في منتصف السبعينات إلى ما دون عشرين دولار مع بداية الثمانينات.

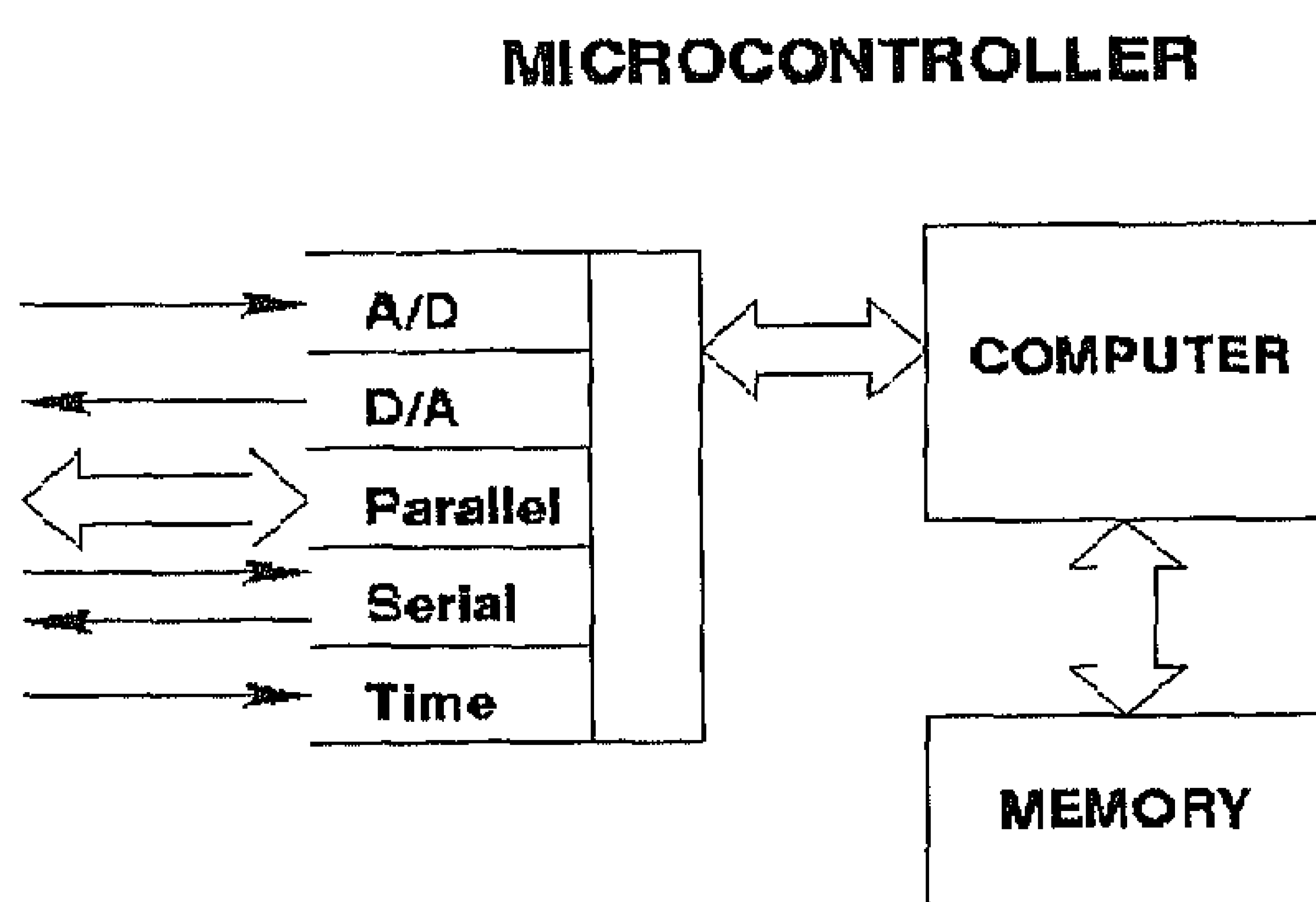
وفي نهاية السبعينات وبداية الثمانينات ظهرت المعالجات الدقيقة ذات الستة عشر بت للبيانات و 20 بت للعناوين وكان من أشهرها معالج إنتل ذي الرقم 8086 والذي ظهر في الأسواق عام 1978م. وعلى الرغم من أن صناعة المعالجات الدقيقة لم تكن حكرا على شركة إنتل الأمريكية بل هنالك المئات من الشركات الصانعة في أمريكا وأوروبا واليابان إلا أن معالجات إنتل كانت مؤشرا رئيسيا على تطور صناعة المعالجات في العالم ولذلك سنقتصر على ذكر تطور معالجات إنتل في الشرح التالي. ففي عام 1982م قامت شركة إنتل بتصنيع معالجها الدقيق (80286) ذي الستة عشر بت للبيانات و 24 بت للعناوين باستخدام 134 ألف ترانزستور وبسرعة 10 ميغاهيرتز وبتقنية 1.5 ميكرومتر. وفي عام 1986م ظهر معالج إنتل (80386) بعرض ناقل بيانات 32 بت وناقل عناوين 32 بت أيضا باستخدام 275 ألف ترانزستور بتقنية (CMOS) بعرض شريط واحد ميكروميتر وبسرعة 33 ميغاهيرتز. وفي عام 1989م ظهر معالج إنتل (80486) بنفس مواصفات سابقه تقريبا باستخدام ما يزيد عن مليون ترانزستور وبسرعة 66 ميغاهيرتز. وفي عام 1993م قامت إنتل بتصنيع أول معالج دقيق من عائلة البنتيوم (Pentium 1) بعرض ناقل بيانات 64 بت وناقل عناوين 32 بت باستخدام ما يزيد عن ثلاثة ملايين ترانزستور بتقنية 0.8 ميكرومتر ويعمل على سرعة مائتي ميغاهيرتز وقد بلغ عدد أرجل الرقاقة 273 رجل. وفي عام 1995م ظهر الجيل الثاني من البنتيوم (Pentium 2) باستخدام ما يزيد عن سبعة ملايين ترانزستور وبسرعة 500 ميغاهيرتز وفي عام 1998م ظهر الجيل الثالث من البنتيوم باستخدام ما يزيد عن عشرة ملايين ترانزستور وبسرعة ألف ميغاهيرتز. وفي عام 2001م ظهر الجيل الرابع (Pentium 4) باستخدام تقنية 0.18 ميكرومتر وبلغ عدد الترانزستورات 42 مليون وبسرعة ألفي ميغاهيرتز وقد ظهر من هذا الجيل عدة أشكال وتم رفع سرعة المعالجة فيها باستخدام تقنيات مختلفة.



وبسبب أن عرض النواقل وسرعة التبديل قد وصلت إلى حدودها العليا ولا مجال لزيادة قدرات الحاسوب أكثر من هذا الحد فقد بدأت الشركات الصانعة في عام 2005م باستخدام أساليب جديدة لزيادة قدرات الحاسوب من أهمها استخدام أكثر من معالج على نفس الرقاقة (multi-core processor). إن أكثر استخدام للمعالجات الدقيقة هو في صناعة الحواسيب وخاصة الحواسيب الشخصية والمحمولة وفي الخادمات (servers) ومحطات العمل (work stations).

إن التطبيقات التي تتطلب استخدام المعالج الدقيق كمتحكم (controller) لا يلزمها في الغالب وجود ناقل العنوانين أو حتى ناقل البيانات بكامل عرضه إذا ما تم وضع الذاكرة وبعض المكونات الأخرى على نفس الرقاقة. إن تحويل المعالج الدقيق إلى حاسوب كامل بناقل بيانات صغير وبقدرات محدودة يقلص كثيرا

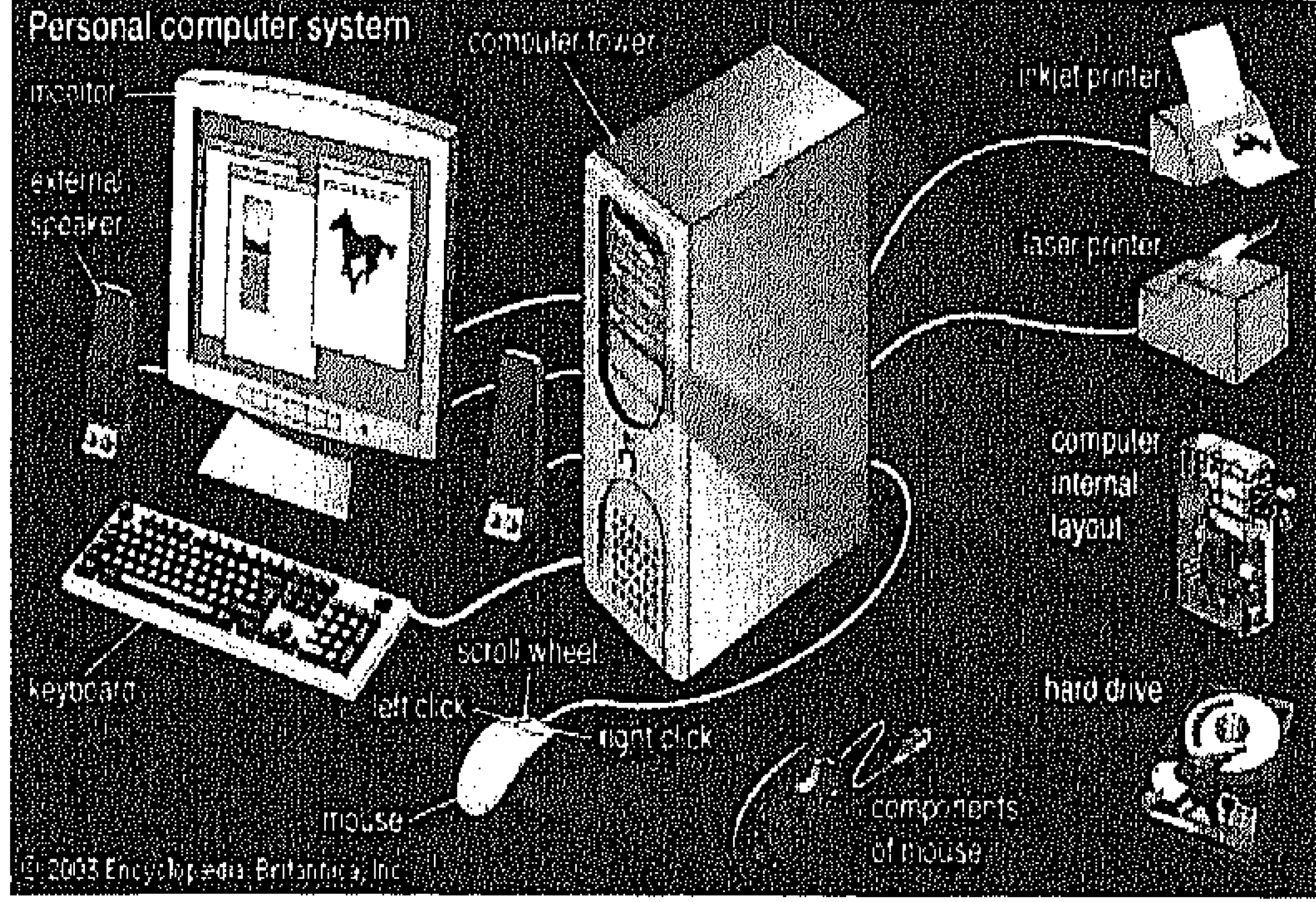
من حجم الرقاقة وذلك بسبب تقليل عدد أرجل الرقاقة في غياب ناقل العناوين وتقليص عرض ناقل البيانات. ولذلك فقد ظهر على التوازي مع المعالجات الدقيقة ما يسمى بالمتحكم الدقيق (microcontroller) وهو عبارة عن حاسوب كامل ولكن بذاكرة صغيرة مصنوع على رقاقة واحدة وعند استخدام هذا المتحكم في أنظمة التحكم المختلفة فإنه لا يلزمه في الغالب رقاقات إضافية لكي يقوم بوظيفته وذلك على العكس من المعالج الدقيق الذي يحتاج إلى عدد كبير من الرقاقات الإضافية لكي يبدأ بالعمل. وتسمى الأنظمة التي تستخدم مثل هذه المتحكمات الدقيقة بالأنظمة المدمجة أو المضمنة (embedded systems) حيث أن المتحكم الدقيق عبارة عن حاسوب كامل يعمل بصمت في داخل الأنظمة التي يحكمها ولا يحتاج إلى وحدات إدخال وإخراج لكي تحكم عمله فهو مبرمج بالكامل للقيام بوظيفته. وقد قامت شركة إنتل في عام 1980م بتصنيع أول متحكم دقيق (8051) لاستخدامه في الأنظمة المدمجة المختلفة وهو حاسوب كامل بوحدة معالجة مركزية وذاكرة وصول عشوائية (RAM) بسعة 128 بايت وذاكرة قراءة فقط (ROM) بسعة أربعة كيلوبايت. ومنذ ذلك الحين



ظهرت أنواع لا حصر لها من المتحكمات تناسب مختلف التطبيقات حيث تحتوي المتحكمات الحديثة إلى جانب مكونات الحاسوب على مكونات أخرى كمحولات الإشارات التشابهية إلى رقمية والرقمية إلى تشابهية (A/D & D/A converters) والمؤقتات (Timers). ويتم برمجة بعض المتحكمات ببرامج ثابتة لا يمكن تغيرها مخزنة على ذاكرة قراءة فقط وبعضها يمكن إعادة برمجتها باستخدام ذاكرات القراءة القابلة للبرمجة (programmable ROM) حيث يوجد طرق مختلفة لبرمجة مثل هذه الذاكرات فبعضها تبرمج لمرة واحدة وبعضها يمكن إعادة برمجتها لعدد كبير من المرات كما في الذاكرات الومضية (Flash memories). بلغ عدد المتحكمات الدقيقة المباعة في عام 2006م أربعة بلايين متحكم وهو يزيد قليلا عن عدد المعالجات الدقيقة المباعة في ذلك العام وتدخل هذه المتحكمات في أنظمة تشغيل أنواع لا حصر لها من الأجهزة والمعدات التي أصبحت أجهزة ذكية تقوم بوظائف معقدة دون تدخل العنصر البشري في تشغيلها. فالمتحكمات المستخدمة في المنازل الحديثة لا يقل عددها عن عدة عشرات في المنزل الواحد موجودة في مختلف الأجهزة والمعدات الموجودة في المنازل كالتلفزيونات والهواتف والمسجلات السمعية والمرئية والثلاجات والغسالات والجلايات والمكيفات وأجهزة الميكروييف والمعدات الطرفية للحاسوب كالطابعات والماسحات الضوئية ولوحات المفاتيح ومشغلات الأقراص وغيرها. وفي المركبات الحديثة بمختلف أنواعها يوجد عشرات المتحكمات تستخدم في محركاتها لزيادة كفاءة عملها وفي مراقبة حالة أنظمتها المختلفة وفي التحكم الذكي بنوافذها ومقاعدها ومريها وأضويتها ومساحاتها. وتستخدم المتحكمات الدقيقة بشكل كبير في المصانع بمختلف أنواعها وفي محطات توليد الكهرباء والآليات والمصاعد والطائرات والقطارات والمعدات والآليات العسكرية والرادارات وأنظمة توجيه الصواريخ والأقمار الصناعية والمركبات الفضائية والأجهزة الطبية والربوتات وغير ذلك من التطبيقات التي يصعب حصرها.

7-7 الحواسيب الشخصية (Personal Computers)

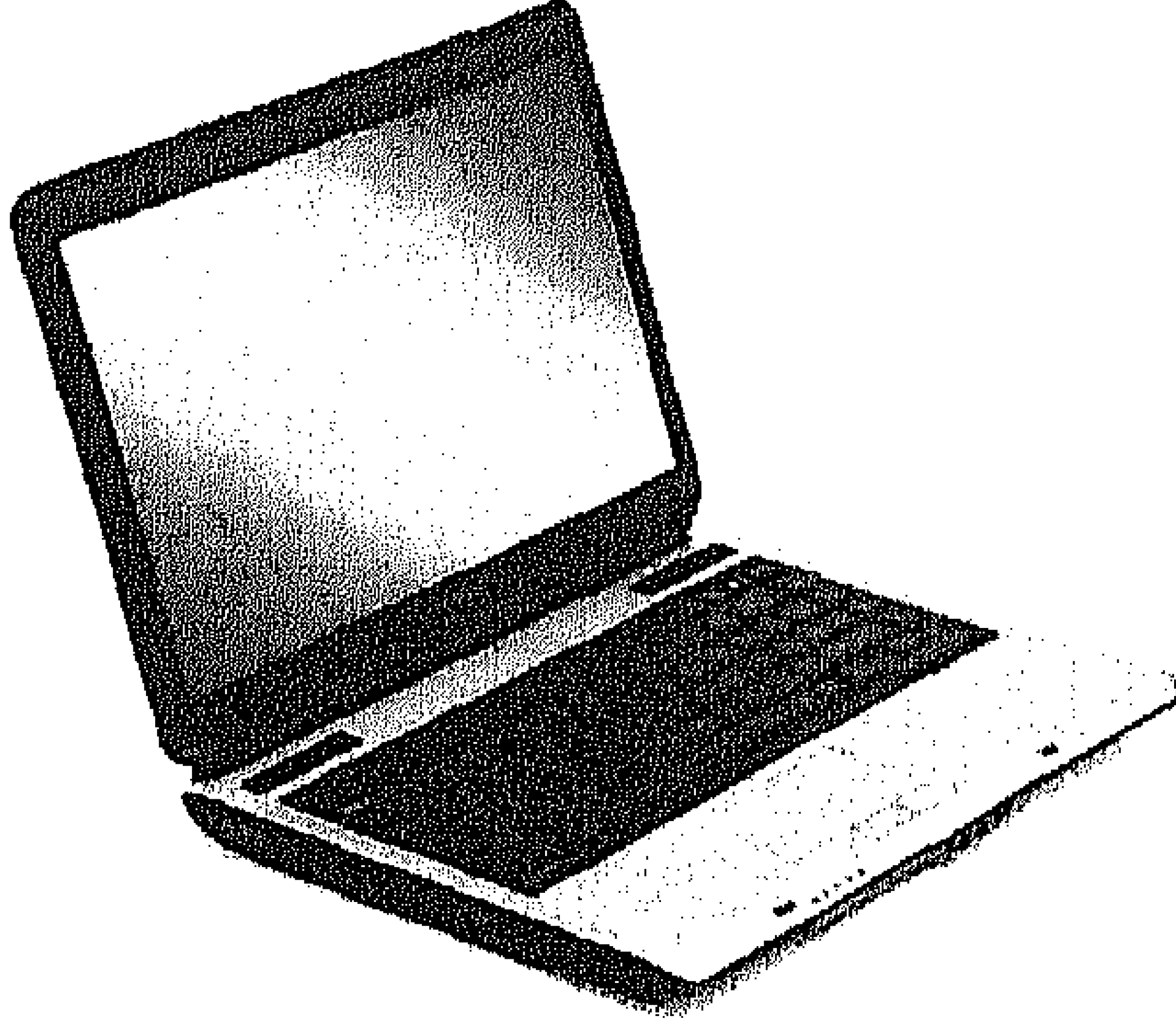
على الرغم من أن الهدف الأول الذي صممت من أجله المعالجات الدقيقة هو لأغراض استخدامه في الآلات الحاسبة المبرمجة إلا أن تزايد قدراته بشكل متسارع أدى إلى التفكير باستخدامه في صناعة الحواسيب الشخصية ففي المنتصف الثاني من السبعينات تم استخدام المعالجات الدقيقة في صناعة أولى الحواسيب الشخصية أو المنزلية وكان أول هذه الحواسيب جهاز الآلتير الذي ظهر في عام 1975م والذي استخدم معالج إنتل ذي الثمن بتات. أما الجهاز الذي لاقى إقبالا شديدا كحاسوب منزلي فهو جهاز الأبل الذي ظهر في عام 1977م وكان يتكون من لوحة مفاتيح وشاشة وكان يستخدم لغة البيسك المخزنة في داخله كنظام تشغيل. وفي نفس العام ظهر في السوق عدة أنواع من الحواسيب المنزلية وبمواصفات جهاز الأبل تقريبا مثل جهاز الكومودور وجهاز راديوشاك. وقد استخدمت هذه الحواسيب في بادئ الأمر سواقة الأشرطة المغناطيسية الشبيهة بالمسجلات السمعية لأغراض التخزين ولكن سرعان ما تم استبدالها بسواقة الأقراص المغناطيسية المرنة بعد ظهورها في عام 1978م.



لقد ارتبط تطور قدرات الحواسيب الشخصية ارتباطا مباشرا بتطور قدرات المعالجات الدقيقة وبأحجام الذاكرات شبه الموصلة وبتقنيات وحدات التخزين المساعدة ووحدات الإدخال والإخراج ولذلك فكلما ظهر جيل جديد من المعالجات ظهر جيل يناظره من الحواسيب الشخصية. وقد كانت سلسلة الحاسبات التي قامت شركة أي بي أم بتصنيعها باستخدام معالجات شركة إنتل نماذج تحتذى من قبل بقية الشركات الصانعة للحواسيب الشخصية التي كانت تستخدم مختلف أنواع المعالجات التي تتوافق مع معالجات إنتل في قدراتها. ففي عام 1981م ظهر أول حاسوب لشركة أي بي أم باستخدام معالج إنتل 8088 بسرعة 5 ميغاهيرتز وذاكرة رئيسية بسعة 64 كيلوبايت ومزود بسواقة أقراص لينة بقطر خمسة وربع إنش. وقد استخدم في هذا الحاسوب أول جيل لنظام التشغيل الذي طورته شركة مايكروسوفت والمسمى بنظام تشغيل دوس (DOS) وقد تم تخزينه على ذاكرة قراءة فقط بسعة 40 كيلوبايت وقد بلغ ثمن هذا الجهاز مع الشاشة ستة آلاف دولار. ونظرا لارتفاع ثمن الجيل الأول من حواسيب "أي بي أم" الشخصية فقد ظهر في الأسواق حواسيب شخصية أكثر بساطة وكانت تستخدم التلفزيونات كشاشة لها والمسجلات السمعية أو سواقات الأقراص المرنة لتحميل البرامج للحاسوب. وكان من أشهر هذه الحواسيب الكومودور 64 الذي ظهر في عام 1982م وقد بلغ ثمنه أربعمائة دولار وقد بيع منه ما يزيد عن عشرين مليون وحدة. وفي عام 1984م ظهر في الأسواق الحاسوب المسمى أبل ماكنتوش بشاشة مدمجة بالحاسوب وقد بني باستخدام معالج موتورولا 68000 ذي الاثنين والثلاثين بت وكان أول حاسوب شخصي يحتوي على واجهة مستخدم رسومية (Graphic user interface). ويستطيع المستخدم أن يعطي الأوامر لهذا الحاسوب باستخدام الفأرة التي يتم تحريك مؤشرها على واجهة الشاشة الرسومية ومن ثم الضغط على الشارة المعنية لتنفيذ الأمر. وقد أعطى هذا الحاسوب شهرة واسعة لسلسلة حواسيب شركة أبل الشخصية التي لم تكن متوافقة مع حواسيب شركة "أي بي أم"

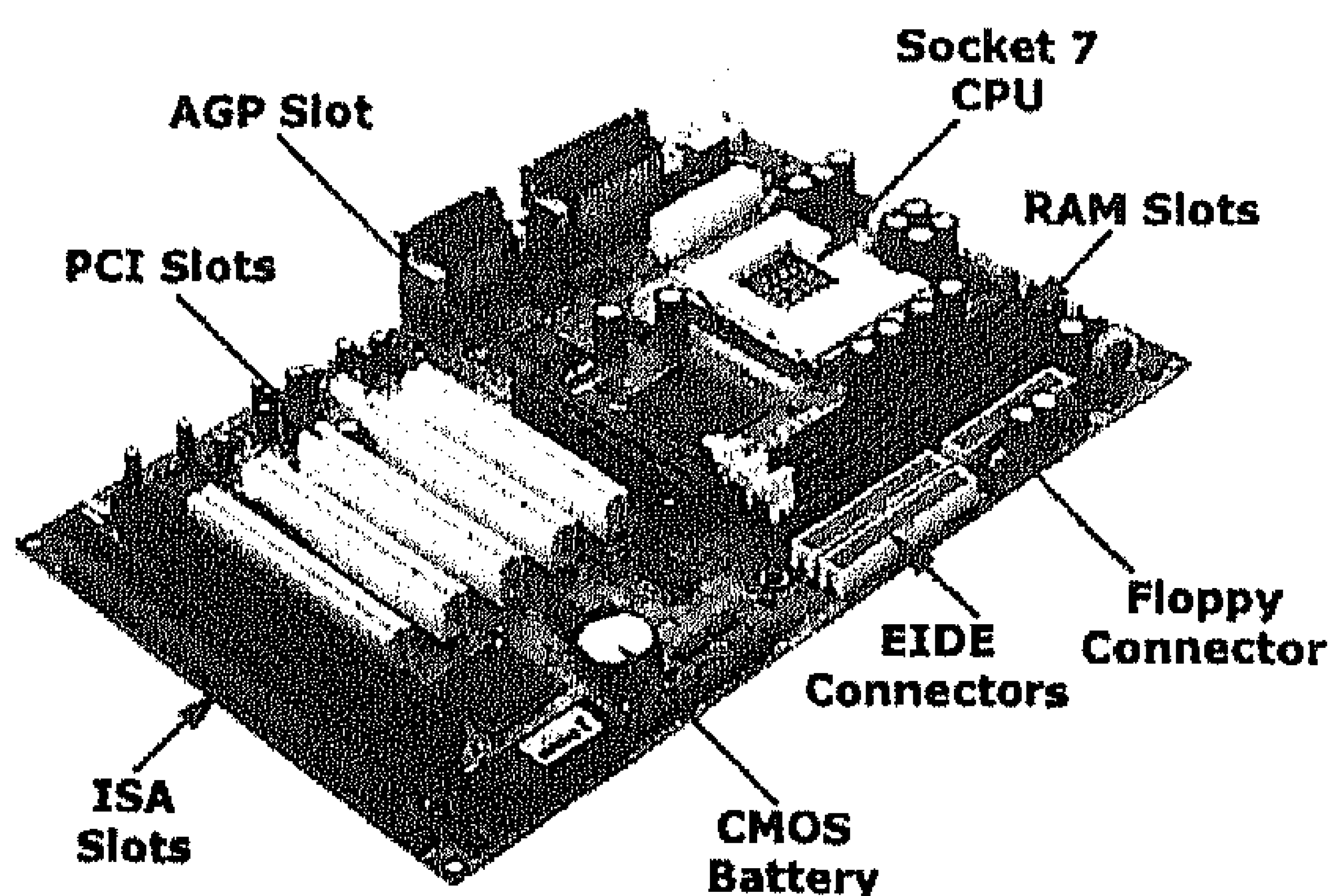
الشخصية. وفي عام 1984م ظهر الجيل الثاني من حواسيب "أي بي أم" والذي استخدم معالج إنتل 286 وكانت سرعته تبلغ 6 ميغاهيرتز وبلغت سعة ذاكرته 640 كيلوبايت وكان مزود بسواقة أقراص صلبة بسعة 20 ميغابايت وسواقة أقراص لينة بقطر ثلاثة وربع إنش وقد بلغ ثمنه مع الشاشة خمسة آلاف دولار. وبفضل سواقة الأقراص الصلبة أصبح استخدام البرامج التطبيقية كمعالجة الكلمات والرسم والجداول البيانية أكثر سهولة. وفي عام 1985م ظهر في الأسواق الحاسوب كومودور أميقا والذي تميز بأنه أول حاسوب شخصي قادر على تشغيل تطبيقات الوسائط المتعددة كتوليد الأصوات المركبة والرسومات عالية الدقة.

وفي عام 1987م ظهر الجيل الثالث من حواسب "أي بي أم" الشخصية باستخدام معالج إنتل 386 ذي الاثنين والثلاثين بت والقادر على تشغيل تطبيقات الوسائط المتعددة (multimedia applications) وقد تم استخدام أول جيل من نظام تشغيل ويندوز (windows operating system) ذي الواجهة الرسومية إلى جانب نظام تشغيل دوس. وفي بداية التسعينات ظهر الجيل الرابع من حواسب "أي بي أم" الشخصية باستخدام معالج إنتل 486 ذي الاثنين والثلاثين بت وبسبب سرعته العالية نسبيا والتي وصلت إلى 66 ميغاهيرتز زاد الإقبال على تطبيقات الوسائط المتعددة وخاصة الصوتية منها. وفي منتصف التسعينات ظهرت الحواسيب الشخصية التي استخدمت أول جيل من معالجات البنتيوم التي وصلت سرعاتها إلى مائتي ميغاهيرتز وبدأ استخدام الحواسيب للاتصال بشبكة الإنترنت وبدأت أسعار الحواسيب تنخفض بشكل كبير بحيث أمكن الحصول على جهاز حاسوب بكامل معداته بمبلغ يقل عن ألف دولار. أما الأجيال التالية من الحواسيب الشخصية والتي استخدمت المعالجات المتطورة من عائلة البنتيوم فإنها لا تختلف عن سابقاتها من حيث المهام التي يمكن أن تنجزها إلا أنها تمتاز عليها بسرعاتها العالية التي زادت عن ألفي ميغاهيرتز وبسعة الذاكرة الرئيسية التي تجاوزت الخمسمائة ميغابايت وبكبر سعة سواقة الأقراص الصلبة التي وصلت ما يزيد عن مائة جيقابايت. لقد تم الاتفاق بين الشركات الصانعة على طريقة سهلة لتصنيع الحواسيب الشخصية بحيث يمكن تصنيع حواسيب بقدرات مختلفة حسب حاجة المستخدم.



ويتكون الحاسوب من لوحة رئيسية تسمى اللوحة الأم (motherboard) وهي عبارة عن لوحة دوائر مطبوعة (printed circuit board) يوجد عليها جميع التوصيلات اللازمة لربط وحدات الحاسوب الرئيسية ويوجد عليها مقابس (sockets) بأشكال مختلفة يثبت عليها رقاقات المعالج الدقيق والذاكرة الرئيسية وذاكرة قراءة فقط لتخزين برنامج تشغيل وتعريف المكونات الأساسية المسمى (BIOS) وكذلك ساعة التوقيت (clock). أما بقية مكونات الحاسوب كلوحة المفاتيح ومشغلات الأقراص والفارة وكروت التحكم بالشاشة والسماعات والطابعات فيتم وصلها من خلال مقابس ومنافذ موجودة على اللوحة الأم. ويلزم لتشغيل اللوحة الأم وبقية مكونات الحاسوب مصدر للطاقة الكهربائية يسمى مزود القدرة (power supply) والتي تقوم بتحويل الجهد المتغير (110\220 فولت) إلى جهد مباشر بقيم مختلفة كما تتطلبها وحدات الحاسوب المختلفة. ويتم تثبيت لوحة المفاتيح ومزود القدرة ومشغلات الأقراص في داخل صندوق واحد بينما يتم توصيل بقية

المكونات الأخرى كلوحة المفاتيح والشاشة والطابعة من خلال المنافذ الخاصة بها. ويوجد في الأسواق نوعين من الحواسيب الشخصية وهي الحواسيب المكتبية (Desktop) الكبيرة الحجم نسبيا ولا يمكن التنقل بها بسهولة وغالبا ما تستخدم شاشات الأشعة المهبطية أما النوع الثاني فهي الحواسيب الحضنية (Laptop) وهي حواسيب صغيرة الحجم لا يتجاوز حجمها عدة كيلوجرامات وهي مزودة ببطارية يمكنها تشغيل الحاسوب لعدة ساعات ولذلك يمكن للشخص أن يحملها ويستخدمها في أي مكان يريد في داخل المنزل أو خارجه كما هو الحال مع الهاتف الخلوي إذا ما قورن بالهاتف الثابت. بلغ عدد الحواسيب الشخصية المباعة في عام 1977م 48 ألف حاسوب أرتفع إلى مائة مليون في عام 2000م ويوجد الآن ما يزيد عن ألف مليون حاسوب شخصي في العالم.



7-8 استخدامات الحاسوب

على الرغم من أن الهدف الرئيسي من تطوير الحاسوب كان لإجراء العمليات الحسابية والرياضية بشكل أسرع مما يستطيعه الإنسان إلا أن دوره لم يتوقف عند هذا المهمة بل تبين أن له قدرة على القيام بمهام أخرى لم تكن تخطر حتى على بال مخترعيه. ففي مجال إجراء العمليات الحسابية والرياضية فقد تم استخدام الحواسيب لحل المشاكل الرياضية التي واجهت العلماء في مختلف التخصصات العلمية والهندسية وبسرعات بدأت في الأربعينات بخمسة آلاف عملية حسابية في الثانية ووصلت مع نهاية القرن العشرين إلى ما يزيد عن مائة مليون عملية في الثانية وقد تصل إلى ألف مليون عملية في غضون سنوات قليلة. ولقد مكنت هذه السرعات الحسابية الهائلة العلماء من القيام بدراسات وأبحاث كان من المستحيل إجراءها بغير الحاسوب ولذا فهو يقف وراء التقدم العلمي المذهل في مختلف المجالات العلمية والصناعية. وقد تم استخدام الحاسوب بكفاءة عالية لمعالجة مختلف أنواع الإشارات الصادرة من مختلف أنواع الأنظمة الكهربائية وغير الكهربائية كإشارات المعلومات الصادرة عن أنظمة الاتصالات وأنظمة الرادارات والإشارات الصوتية الصادرة عن الإنسان والإشارات الموسيقية وإشارات الاهتزازات الصادرة عن الآلات الميكانيكية والكهربائية وتلك الصادرة عن الزلازل والبراكين والتفجيرات التقليدية والذرية. وتم استخدامه كذلك لعمل محاكاة لكثير من الظواهر الطبيعية والعمليات الصناعية التي يصعب دراستها بالطرق التحليلية ويصعب كذلك إجراء تجارب عملية كتلك التي واجهها العلماء في مجال دراسة الطقس والتفجيرات الذرية ومجال الطيران وإطلاق الصواريخ والعمليات الكيميائية والبيولوجية. وفي مجال المراقبة والتحكم تبين أن الحاسوب قادر على تنفيذ أوامر يمكنه من خلالها قراءة مخارج أنواع مختلفة من المستشعرات بعد تحويل إشاراتها الكهربائية التشابهية إلى إشارات رقمية وكذلك التحكم بمختلف أنواع الأجهزة والمعدات الإلكترونية التي يتم ربطها به بمختلف وسائل الاتصال الكهربائية. ولذلك فقد تم استخدامه في الستينات للتحكم في سير المكالمات الهاتفية في المقاسم

الإلكترونية وللمراقبة والتحكم في محطات توليد الطاقة الكهربائية والمفاعلات الذرية ومصافي البترول والصناعات البترولية والكيمائية والنسيجية والمطابع وخطوط إنتاج مختلف أنواع القطع والأجهزة والمعدات الصناعية وبشكل يفوق قدرة البشر حيث أنه لا يصيبه الملل ولا يرهقه التعب عند مراقبته ومتابعته لسير عمليات التصنيع المختلفة.

ومع اختراع المعالجات والمتحكمات الدقيقة في السبعينات توسعت دائرة استخدام الحاسوب كجهاز للمراقبة والتحكم في مختلف الأجهزة والمعدات مهما صغر حجمها كما في الهواتف الثابتة والخلوية وفي التلفزيونات والكاميرات وأجهزة التسجيل السمعية والمرئية والأجهزة الطبية وفي أجزاء كثيرة من مقاسم الهواتف وفي الثلاجات والغسالات والأفران وفي الألعاب الإلكترونية والآلات الحاسبة والآلات الموسيقية والإشارات الضوئية وفي السيارات والطائرات والقطارات ومختلف أنواع المعدات العسكرية وكذلك التحكم بإطلاق الصواريخ التي تحمل الأقمار الصناعية والمركبات الفضائية والصواريخ الحربية. وفي مجال المعلومات تم استخدام الحاسوب لتخزين ومعالجة واسترجاع مختلف أنواع المعلومات كالنصوص الكتابية والرسوم والصور الفوتوغرافية والإشارات السمعية والمرئية. ففي السبعينات ظهرت برامج معالجة النصوص (word processing) والتي يمكن من خلالها كتابة النصوص باستخدام لوحة المفاتيح وتخزينها في الذاكرات المساعدة لحين الحاجة إليها. وتتميز معالجة النصوص باستخدام الحاسوب بسهولة تعديل النصوص من خلال التنسيق والإضافة والحذف والتقديم والتأخير وتصحيح الأخطاء وتغيير نوع وحجم الخطوط قبل طبع النص على الورق باستخدام الطابعات الحاسوبية ولقد أدت هذه السهولة البالغة في معالجة النصوص في اختفاء الطابعات التقليدية. وفي الثمانينات ظهرت برامج البيانات المجدولة (spreadsheets) والتي يمكن من خلالها إدخال النصوص والأرقام في خلايا تلك الجداول ومن ثم القيام بمختلف العمليات الحسابية والإحصائية من خلال استخدام معادلات رياضية ومنطقية تربط بين مدخلات الخلايا المختلفة. ولقد وجدت هذه الجداول تطبيقات لا حصر لها في المحال التجارية والمصانع والبنوك والمدارس والجامعات. وظهرت كذلك برامج قواعد البيانات (databases) التي يتم فيها إدخال مختلف أنواع البيانات وتبويبها وتصنيفها بحيث يمكن للمستخدم الوصول إلى معلومة ما بأسرع وقت ممكن ومثال ذلك الوصول لكتاب ما في مكتبة تحتوي على ملايين الكتب. وكذلك ظهرت برامج الرسم (graphic programs) التي يمكن من خلالها رسم مختلف الأشكال الهندسية والبيانية والصور الثابتة والمتحركة وقد تطورت قدرات برامج الرسم بشكل كبير جدا بحيث أصبح بالإمكان رسم صور ثلاثية الأبعاد ويمكن مشاهدتها من مختلف الاتجاهات. أما برامج التصميم بمساعدة الحاسوب فقد كانت السبب وراء التطور المذهل في مختلف الصناعات فقد ساعدت هذه البرامج المهندسين بمختلف تخصصاتهم على عمل تصاميم لمختلف أنواع القطع والأجهزة والمعدات والمركبات والطائرات والقطارات والصواريخ حيث تتميز هذه التصاميم الحاسوبية بسهولة رسمها وتعديلها ومشاهدتها من مختلف زوايا النظر وذلك على العكس من التصميم بالرسم على الورق الذي كان يتطلب جهدا كبيرا وتركيزا عاليا. هذا بالإضافة إلى أن الحاسوب قادر على عمل تصاميم بالغة التعقيد ما كان بمقدور المهندسين أن يعملوها بدونه فعلى سبيل المثال فلولا الحاسوب لكان تصميم دائرة إلكترونية لمعالج دقيق يحتوي على مليون ترانزستور عملا مستحيلا باستخدام الطرق التقليدية.

ومع زيادة قدرات الحاسوب المختلفة كسرعة المعالجة وسعة التخزين أصبح بإمكان الحاسوب تخزين ومعالجة واسترجاع الإشارات السمعية والمرئية حيث أمكن تخزين آلاف الساعات من الإشارات السمعية وعشرات الساعات من الإشارات المرئية على قرص ضوئي مدمج لا يتجاوز قطره خمسة إنشات.

وأصبح بإمكانه كذلك التعرف على الأصوات البشرية مما مكن المستخدمين من إعطاء الأوامر إليه مباشرة من خلال المخاطبة الكلامية. وفي مجال الموسيقى تم استخدام الحاسوب لتوليد الأصوات التي تصدرها جميع أنواع الآلات الموسيقية المعروفة إلى جانب توليد أصوات موسيقية جديدة ومزج هذه الأصوات مع بعضها لتأليف القطع الموسيقية وتم استخدامه كذلك لتوليد الأصوات الصادرة عن الإنسان والحيوانات والطيور والحشرات والأصوات الصادرة عن الطبيعة. ومن الاستخدامات التي ساعدت على انتشار الحاسوب بشكل أسرع مما كان يتوقع هو استخدامه كجهاز للتسلية والترفيه حيث كانت الألعاب التي وفرها الحاسوب للمستخدمين وخاصة الأطفال منهم الدافع الرئيسي لشراء تلك الأجهزة وأصبحت صناعة برامج الألعاب الحاسوبية أكثر رواجا من صناعة البرامج الأخرى وأصبحت كذلك الدافع وراء تطوير القدرات العالية للحاسوب حيث تحتاج هذه الألعاب سرعات عالية وذاكرات كبيرة أكثر مما تحتاجه التطبيقات الأخرى. وأما استخدام الحاسوب للأغراض التعليمية فقد جاء متأخرا على استخدامه في مجال الألعاب وعلى الرغم من الدعم الكبير الذي تقدمه الحكومات والمنظمات الدولية لتطوير المناهج التعليمية المحوسبة إلا أن استخدامها من قبل الدارسين بمختلف أعمارهم لا يوازي إقبالهم على ألعاب الحاسوب.

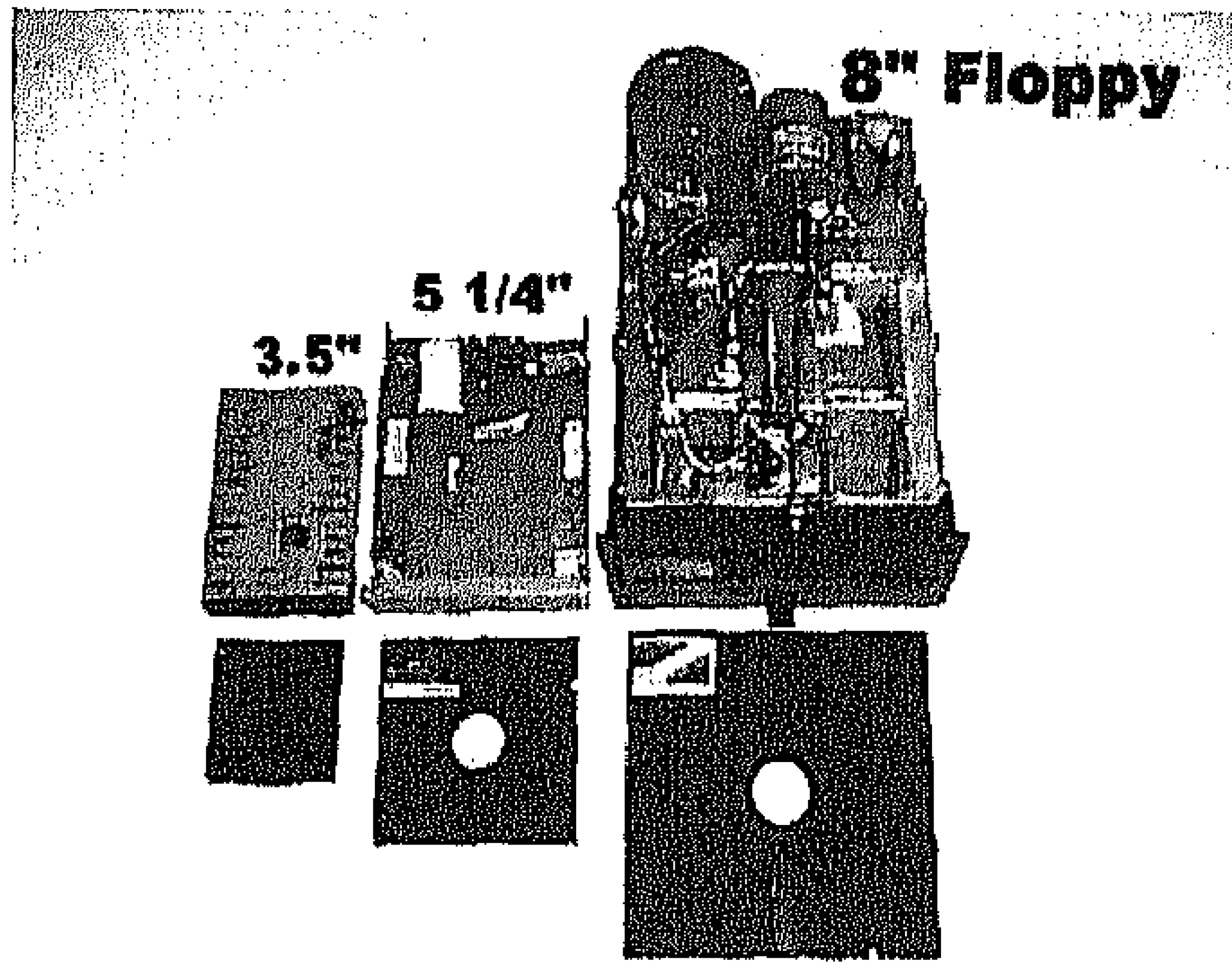
7-9 المعلومات وطرق تخزينها وضغطها وتعميتها

إن تسمية هذا العصر بعصر المعلومات لا يعود فقط لضخامة المعلومات التي أنتجها العقل البشري بل أيضا إلى السرعة العالية التي يتم بها نقل المعلومات باستخدام أنظمة الاتصالات والسهولة البالغة التي يتم بها تخزين ومعالجة واسترجاع المعلومات باستخدام الحواسيب والمسجلات السمعية والمرئية. وعلى الرغم من أن ثورة المعلومات ظهرت مع ظهور التلغراف والهاتف في القرن التاسع عشر وقفزت قفزة كبيرة بعد ظهور الحواسيب في منتصف القرن العشرين إلا أنها لم تصبح واقعا ملموسا إلا في بداية التسعينات وذلك بعد ظهور شبكات المعلومات وخاصة شبكة الإنترنت. ولا يكاد يخلو اليوم منزل في هذا العالم من أحد أجهزة إرسال واستقبال المعلومات كالهاتف والفاكس والراديو والتلفزيون والحاسوب والمسجلات السمعية والمرئية التي يتدفق منها كميات ضخمة من المعلومات التي تبثها آلاف المحطات الإذاعية والتلفزيونية أو تنقلها شبكات الهواتف وشبكات المعلومات المختلفة. ولكي نستوعب أهمية الدور الذي تلعبه أنظمة الاتصالات والمعلومات في مختلف مناحي الحياة فما علينا إلا أن نتخيل ما سيكون عليه الحال فيما لو توقفت جميع أنظمة وشبكات الاتصالات في العالم عن العمل فسيصيب الشلل على الفور التجارة الدولية والحركة المالية وسيزداد عدد المسافرين وعدد الرسائل بشكل لا يمكن تصوره وسيزداد الطلب على الورق والوقود وسيصيب الناس كثير من المشاكل النفسية والاجتماعية بسبب الفراغ الناتج عن غياب البث التلفزيوني والإذاعي والاتصال بشبكة الإنترنت.

لقد أصبحت صناعة المعلومات من أكبر الصناعات في نهاية القرن العشرين حيث تشمل هذه الصناعة ثلاث قطاعات رئيسية وهي قطاع الاتصالات وقطاع الحوسبة وقطاع التجهيزات السمعية والمرئية. يقوم قطاع الاتصالات بنقل وتوزيع مختلف أنواع المعلومات باستخدام أنظمة الاتصالات المختلفة التي أصبحت خدماتها تغطي جميع أرجاء الكرة الأرضية. أما قطاع الحوسبة فيقوم بمهمة تخزين ومعالجة واسترجاع المعلومات بمختلف أنواعها باستخدام مختلف أنواع الحواسيب التي تم ربطها ببعضها من خلال شبكات حواسيب محلية وعالمية ساعدت على تسهيل حركة المعلومات بين مراكز المعلومات مهما تباعدت

المسافات بينها. أما قطاع التجهيزات فيقوم بجمع مختلف أنواع المعلومات باستخدام أجهزة القياس والتحكم واللواقط والمستشعرات والرادارات والكاميرات وتخزينها في مختلف أنواع المسجلات السمعية والمرئية وأجهزة التخزين الحاسوبية وعرضها باستخدام أنواع مختلفة من أجهزة العرض كشاشات أنابيب الأشعة المهبطية وشاشات العرض البلورية وغيرها.

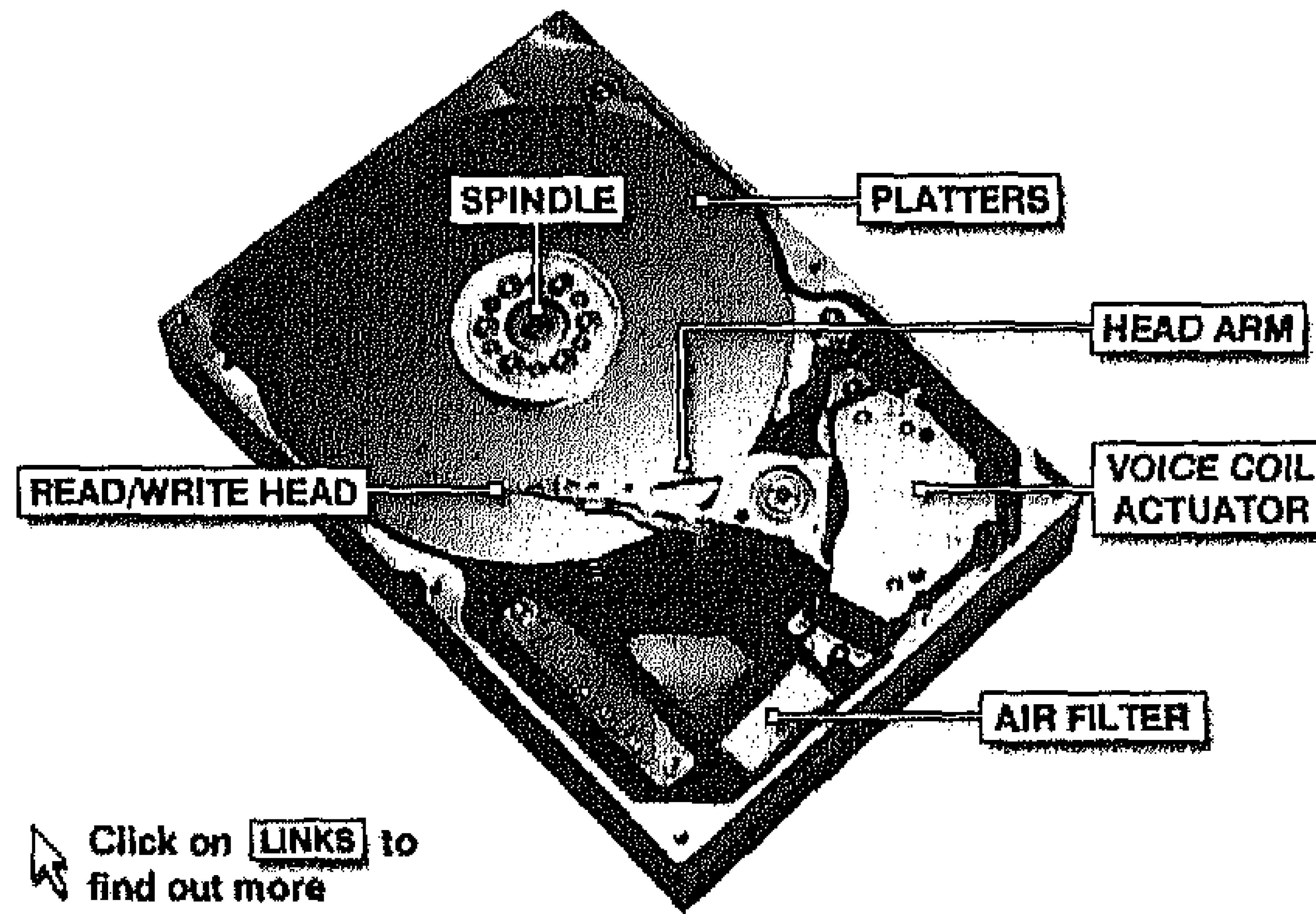
لقد تمكن الإنسان منذ أن أسكنه الله على هذه الأرض أن يستخدم حواسه وعقله لجمع وإنتاج المعلومات التي استخدمها في زيادة رفاهيته وفي بناء حضارات متقدمة. ومع بزوغ فجر الثورة العلمية في مطلع القرن السابع عشر ازداد معدل إنتاج المعلومات في مختلف مجالات الحياة وظهرت علوم جديدة كعلوم الرياضيات والفيزياء والكيمياء والأحياء والفلك والجيولوجيا والإحصاء والعلوم الهندسية المختلفة كالميكانيكا والكهرباء والطيران والعلوم الطبية. ومع اختراع الحاسوب في منتصف القرن العشرين حدثت نقلة نوعية جديدة في معدلات إنتاج المعلومات حيث يمكن للحاسوب أن يعالج المعلومات بسرعات مذهلة يعجز العقل البشري أن يقوم بها. وعلى الرغم من أن الحاسوب لا يملك القدرات العقلية المختلفة التي يملكها العقل البشري إلا أنه يتميز عليه بسرعته الفائقة في تنفيذ الأوامر التي تحتاج إلى تكرار كبير ولذلك تم استخدامه من قبل الإنسان لإنجاز مختلف المهمات الحسابية والمنطقية والحصول على مزيد من المعلومات. ولم يقتصر دور الحاسوب في مساعدة الإنسان على توليد معلومات جديدة بل تبين أنه قادر على القيام بمهام جديدة في مجال المعلومات لا تقل أهمية عن المهمة الأساسية التي صمم من أجلها. ومن أهم وأكبر هذه المهام هي قدرة الحاسوب الفائقة على تخزين كميات ضخمة من المعلومات في وسائل التخزين المختلفة والتي يمكن للمستخدم من خلاله أن يصل للمعلومة التي يريد من خلال البحث الإلكتروني بسرعة تفوق ملايين المرات سرعة البحث اليدوي في بطون الكتب والمجلات والوثائق والصحف. ولم يتوقف الأمر عند تخزين المعلومات المقروءة كالنصوص والرسوم بل تعدى إلى تخزين المعلومات المسموعة والمرئية والتي يمكن الوصول لأي جزء منها في ثواني معدودة وذلك على عكس المسجلات السمعية والمرئية التي يستغرق الوصول إلي المعلومات فيها عشرات الدقائق.



أما المهمة الأخرى للحاسوب في مجال أنظمة المعلومات والتي لا تقل أهمية عن سابقتيها فهي قدرته على التخاطب مع بقية الحواسيب من خلال ما يسمى بشبكات الحواسيب والتي يتم فيها ربط الحواسيب ببعضها مهما كان موقعها الجغرافي باستخدام أنظمة وشبكات الاتصالات المختلفة مما مكن من تداول المعلومات في أقل من لمح البصر. إن أحد سيئات أنظمة المعلومات الحاسوبية هو حاجة المستخدم لحاسوب يعمل بالطاقة الكهربائية لكي يتمكن من الوصول للمعلومات وفي حالة عدم توفر الطاقة الكهربائية أو عدم توفر أجهزة الحاسوب تصبح المعلومات المخزنة على الأقراص المغناطيسية والضوئية لا قيمة لها. وأما السيئة الثانية فهي أن وسائل التخزين الحاسوبية كالأقراص المغناطيسية والضوئية لا يمكنها الاحتفاظ بالمعلومات لأكثر من عشرين عاما حيث أن الخصائص المغناطيسية والضوئية لهذه الأقراص تتغير مع مرور الزمن وقد تتلف نتيجة لتعرضها للمجالات المغناطيسية والإشعاعات المختلفة مما يؤدي لضياع المعلومات المختزنة فيها وهذا على عكس الكتب التي يمكنها الاحتفاظ بالمعلومات لآلاف السنين.

لقد حاول الإنسان منذ فجر التاريخ أن يبحث عن وسائل تساعد ذاكرته العقلية على حفظ أكبر قدر ممكن من المعلومات ولأطول وقت ممكن وذلك بعد أن تبين أن المعلومات التي تحتفظ بها ذاكرة الإنسان قد تتعرض للنسيان أثناء حياته وللتلف التام بعد مماته. وكان في الماضي يتم تناقل المعلومات المهمة من جيل إلى جيل من خلال تداولها بالكلام فيحفظها من يحفظها وينساها من ينساها وقد تمكن الإنسان في عصوره الأولى من تدوين بعض أنواع المعلومات من خلال نقش الرسوم على الصخور والحجارة. ومع اكتشاف الكتابة في عصور لاحقة بدأ التخزين الحقيقي للمعلومات من خلال الكتابة على الألواح الحجرية والجلود وعلى جذوع وأوراق بعض الأشجار. أما الثورة الحقيقية في طرق تخزين المعلومات فقد بدأت بعد اختراع الورق واستخدامه كوسيلة لحفظ المعلومات من خلال الكتابة عليه. ومع اختراع الآلات الكاتبة والمطابع في القرن الثامن عشر تفجرت ثورة جديدة في مجال حفظ وتوزيع المعلومات حيث ساعدت المطابع على إنتاج أعداد كبيرة من نسخ الكتاب الواحد في ساعات معدودة بعد أن كانت عملية نسخ الكتاب الواحد تستغرق عدة أيام باستخدام الطريقة اليدوية مما أدى إلى انتشار المعلومات المكتوبة بشكل كبير في مختلف الأوساط. لقد اقتصر حفظ المعلومات في الماضي على شكل واحد من أشكال المعلومات وهي المعلومات المقروءة والتي تشمل المعلومات المكتوبة والمرسومة والمصورة أما المعلومات المسموعة والمرئية فلم يحالف الإنسان الحظ في إيجاد وسائل لحفظها إلا في منتصف القرن العشرين بعد أن تمكن الإنسان من تحويل هذا النوع من المعلومات إلى إشارات كهربائية. لقد تم اختراع المسجلات السمعية في الثلاثينات من القرن العشرين حيث تتكون من شريط بلاستيكي مرن مغطى بطبقة رقيقة من مادة مغناطيسية ويتم تسجيل الأصوات على الشريط المغناطيسي بعد أن يتم تحويلها باستخدام الميكرفون إلى إشارة كهربائية. ولا تختلف المسجلات المرئية عن المسجلات السمعية من حيث مبدأ العمل إلا أنها أكثر تعقيدا بسبب ارتفاع ترددات الإشارات المرئية والتي قد تزيد بألف مرة عن ترددات الإشارات السمعية مما يستلزم استخدام دوائر إلكترونية ومحركات كهربائية ذات مواصفات عالية.

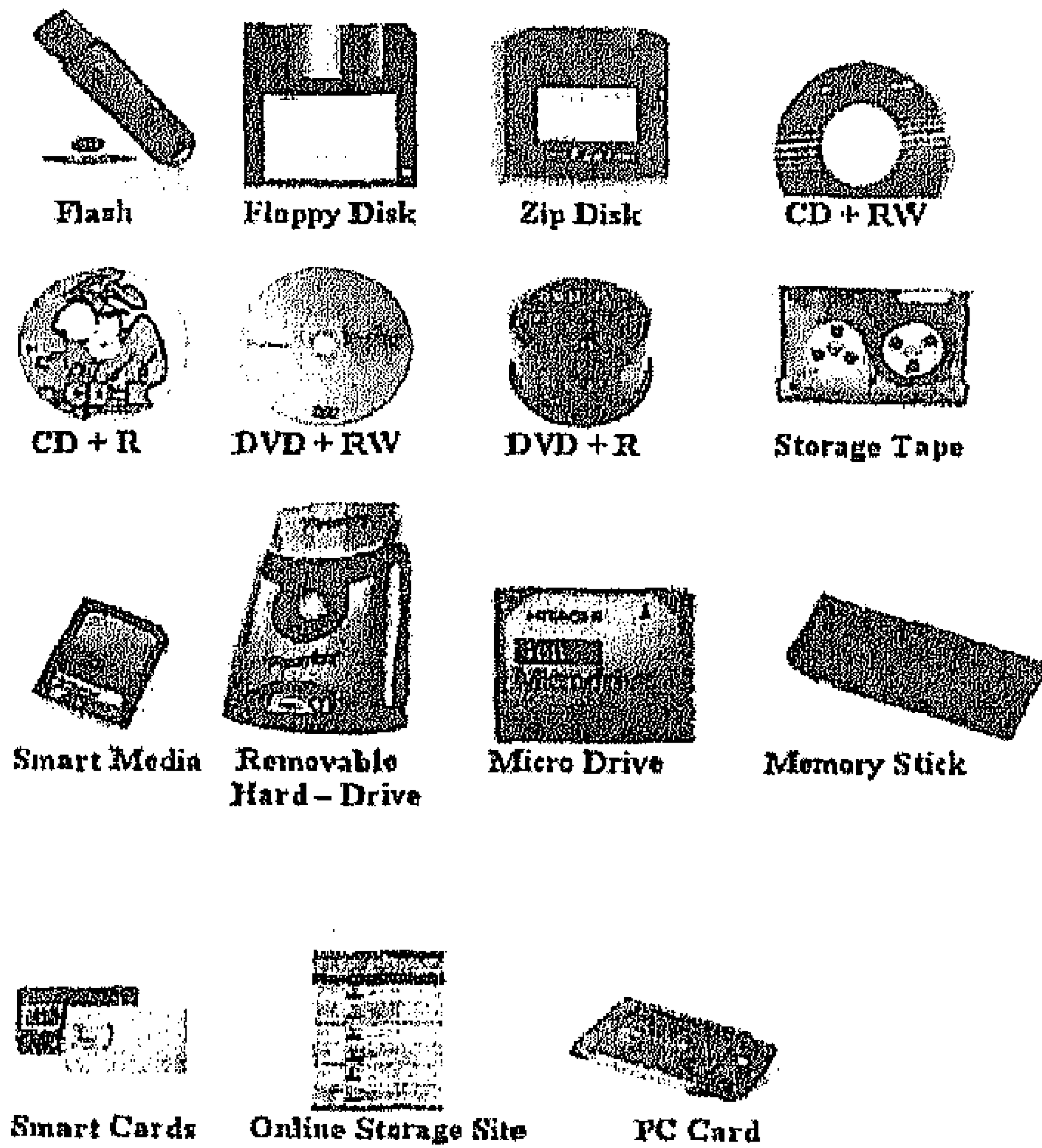
ومع اختراع الحاسوب في الأربعينات من القرن العشرين تم استخدام الأشرطة المغناطيسية لتخزين البرامج والبيانات التي يتعامل معها الحاسوب بعد تحويل هذا النوع من المعلومات إلى إشارات رقمية ثنائية يتم تسجيلها على الشريط بشكل متسلسل ويتم قراءة هذه المعلومات من قبل الحاسوب بشكل متسلسل وبطيء. وفي بداية الستينات تم اختراع الأقراص المغناطيسية كبديل عن الأشرطة المغناطيسية ويتكون من قرص دائري يبلغ قطره عدة بوصات



مصنوع من الألمنيوم أو من مواد خزفية أو بلاستيكية ويتم تغطية أحد أو كلا وجهيه بطبقة رقيقة من مادة مغناطيسية كتلك الموجودة على الأشرطة المغناطيسية. ويتم تسجيل المعلومات على سطحي القرص باستخدام رؤوس تسجيل شبيهة بتلك المستخدمة في المسجلات السمعية والمرئية إلا أنها غير ثابتة بل يمكن تحريكها في الاتجاه المحوري للقرص بينما يتم تدوير القرص بسرعة عالية أمام رؤوس التسجيل باستخدام محركات

كهربائية بالغة الدقة. وحتى يتمكن الحاسوب من الوصول للمعلومات المسجلة على القرص بسرعة عالية يتم تقسيم سطح القرص إلى عدد كبير من المسارات الدائرية المتمركزة حول مركز القرص ومن ثم يتم تقسيم كل مسار دائري إلى قطاعات يزداد عددها كلما ابتعدنا عن مركز القرص بحيث يحوي القطاع الواحد على كمية محددة من المعلومات. وعندما يقوم الحاسوب بتهيئة القرص ليكون جاهزا للكتابة عليه يتم تحديد عنوان كل من هذه القطاعات وتخزينها على نفس القرص بحيث يمكن الوصول للقطاع مباشرة لكتابة المعلومات عليه أو لقراءة المعلومات منه وذلك دون التوقف عند بقية القطاعات. وقد ساعدت هذه الطريقة الذكية في تهيئة الأقراص المغناطيسية الحاسوب في الوصول للمعلومات التي تلزمه في زمن لا يتجاوز عدة عشرات من الميلي ثانية. وعلى الرغم من أن قطر القرص المغناطيسي والمادة المغناطيسية التي تغلفه لم يتغيرا كثيرا منذ اختراعه إلا أن كمية المعلومات التي يمكنه أن يخزنها قد زادت من عشرات الميغابايت في الستينات إلى ما يزيد عن مئات الجيغابايت في الوقت الحالي. وقد تم ذلك من خلال تطوير تقنية الرؤوس المغناطيسية التي ارتفعت حساسيتها بشكل كبير بحيث يمكنها كتابة المعلومة الرقمية بأبعاد لا تتجاوز جزء من مليون جزء من المتر أي أنه يمكن تخزين عدة جيقابت من المعلومات على البوصة المربعة الواحدة. إن هذه الكميات الضخمة من المعلومات التي يمكن للأقراص المغناطيسية تخزينها لا يمكن أن تتم إلا على أقراص ثابتة في داخل سواقة أقراص محكمة الإغلاق تمنع دخول ذرات الغبار مهما صغر حجمها. إن قدرة القرص على التخزين تزداد كلما قل الفراغ الفاصل بين رؤوس التسجيل والقراءة وبين سطح القرص والتي تصل في الأنواع الحديثة إلى أقل من عشر ملليمتر مما يعني أن دخول ذرة غبار بين الرأس والقرص قد يدمر كلا من الرأس والمادة المغناطيسية على القرص وقد أطلق على هذا النوع من الأقراص التي لا يمكن إخراجها من سواقة الأقراص اسم الأقراص الصلبة (hard disks).

ومع انتشار الحواسيب في الثمانينات وازدياد أعداد البرامج التي يحتاجها مستخدمي الحواسيب برزت الحاجة لوسائل تخزين يسهل من خلالها نقل البرامج المختلفة من مكان إلى آخر. وقد ظهر في نهاية السبعينات نوع آخر من سواقات الأقراص المغناطيسية والتي أطلق عليها اسم الأقراص المرنة (floppy disks) حيث يمكن إدخال وإخراج هذا النوع من الأقراص في سواقة الأقراص الخاصة بها. وبسبب صعوبة منع دخول الغبار بين الرأس وسطح القرص فقد اضطر مصممي هذه السواقات لترك فراغ كافي بين الرأس والسطح تسمح بمرور ذرات الغبار بينهما دون أن تدمرهما وقد أدى هذا الإجراء إلى تقليل كمية المعلومات التي يمكن للقرص تخزينها بشكل كبير جدا حيث لا تتجاوز سعة الأقراص المرنة الدارجة واحد ونصف ميغابايت. إن سعة الأقراص المرنة غير كافية لنقل كثير من برامج الحاسوب التي ظهرت في الثمانينات كأنظمة التشغيل حيث يلزم لنقل بعض البرامج عشرات الأقراص المرنة والتي يلزم تحميلها على الحاسوب وقتا طويلا بسبب بطئها الشديد.

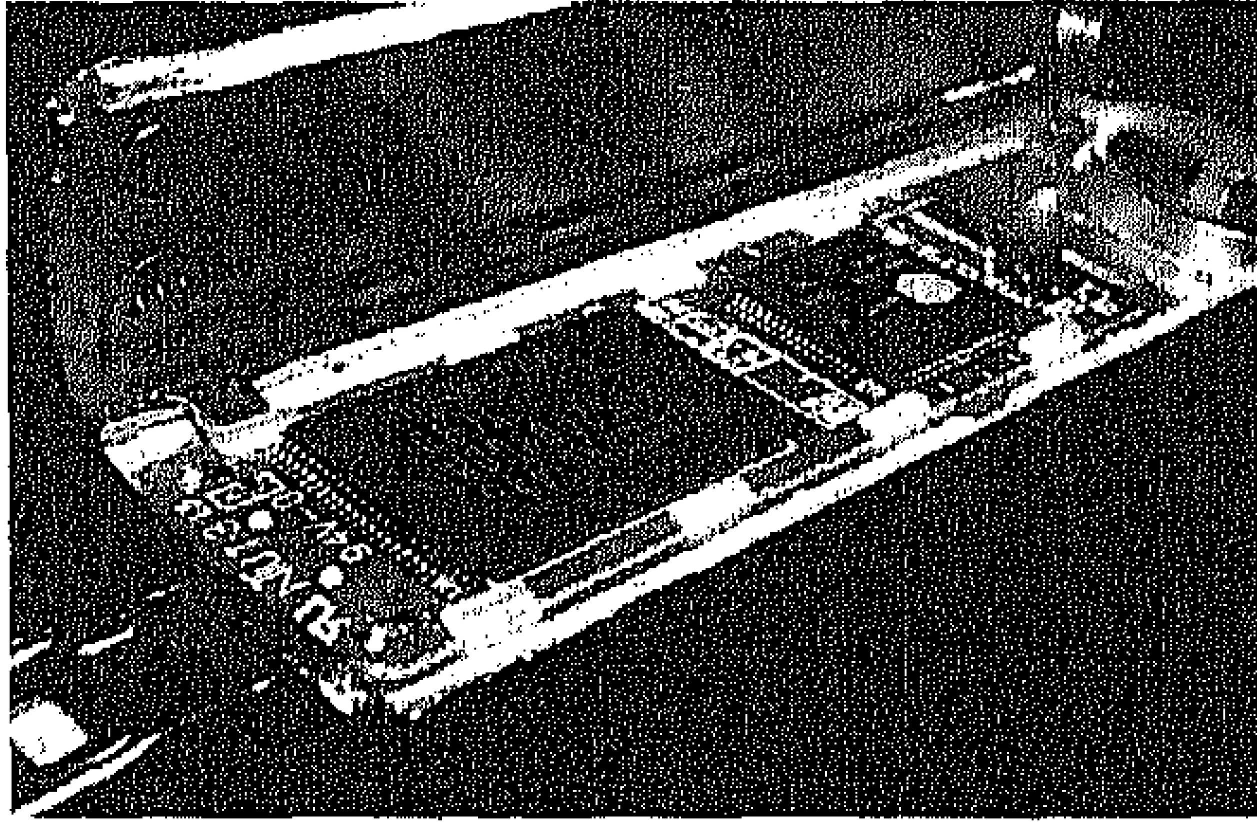


وفي أوائل الثمانينات ظهرت بوادر لحل مشكلة نقل البرامج بعد أن تمكن العلماء من اكتشاف طريقة جديدة لتخزين المعلومات باستخدام ضوء الليزر حيث تبين لهم أنه يمكن تغيير خصائص بعض المواد العضوية الحساسة للضوء من خلال تسليط ضوء الليزر عليها. ومن أهم الخصائص التي يمكن التحكم بها خاصية انعكاس الضوء عن أسطحها وقد أطلق على وسائل التخزين هذه الأقراص الضوئية (optical disks). ويبلغ قطر القرص الضوئي اثني عشر سنتيمتر وبسمك مليمتر واحد تقريبا ويتكون من عدة طبقات وهي طبقة داعمة مصنوعة من مادة بلاستيكية صلبة تشكل هيكل القرص يتم طلاء أحد وجهيها بطبقة رقيقة من مادة حساسة للضوء وهي التي يتم تسجيل المعلومات عليها وتليها طبقة أخرى من مادة شفافة للضوء تعمل على حماية الطبقة الحساسة للضوء من المؤثرات الخارجية وبهذا التركيب فإن المعلومات لا تكتب إلا على وجه واحد من وجهي القرص وذلك على عكس الأقراص المغناطيسية التي تسمح بكتابة المعلومات على كلا وجهيها. ويتم كتابة المعلومات الرقمية على القرص باستخدام ليزر له شدة ضوئية قادرة على تغيير خصائص المادة الحساسة للضوء فعند تسليط ضوء ليزر قوي على جزء معين من القرص فإن خصائص المادة الحساسة تتغير بحيث تصبح معتمة وغير قادرة على عكس الضوء عنها أما المناطق التي لم تتعرض لضوء الليزر فإن قدرتها على عكس الضوء تبقى كما هي وبهذا يمكن كتابة الرقمين واحد وصفر من خلال تسليط أو عدم تسليط الضوء على منطقة الكتابة الموجودة على سطح القرص. أما قراءة المعلومات من سطح القرص فتتم باستخدام ليزر له شدة ضوء أقل منها في ليزر الكتابة وذلك من خلال تسليط ضوء الليزر على سطح القرص واستخدام كاشف ضوئي يلتقط شدة الضوء المنعكس عن سطح القرص والذي تكون شدته قليلة عند الأماكن المعتمة والتي تمثل الرقم واحد وعالية عند المناطق العاكسة التي تمثل الرقم صفر أو العكس. أن أهم ما يميز الأقراص الضوئية على الأقراص المغناطيسية هو إمكانية وضع رؤوس الكتابة والقراءة على مسافة بعيدة نسبيا عن سطح القرص حيث أن عرض شعاع الليزر والذي يحدد المساحة التي تحتلها وحدة المعلومات لا يتغير كثيرا مع ابتعاده عن مصدره خاصة عند استخدام العدسات ولذلك يمكن إدخال وإخراج هذه الأقراص من السواقات دون الخوف من تأثير ذرات الغبار عليها. وقد تمكن المهندسون باستخدام ليزرات ذات عرض شعاع ضيق جدا لا يتجاوز عدة ميكروميترات من كتابة كميات ضخمة من المعلومات على الأقراص الضوئية حيث تصل سعة الواحد منها ما يزيد عن ستمائة مليون بايت وهو ما يزيد عن سعة أربعمائة قرص مغناطيسي مرن.

وبظهور الأقراص الضوئية تم حل مشكلة نقل برامج الحاسوب وحفظها بشكل نهائي حيث أن سعته التخزينية من الكبر بحيث تستوعب أكبر برامج الحاسوب حجما. وقد كان لظهور الأقراص الضوئية بهذه السعة الهائلة دورا بارزا في تطور تقنيات الوسائط المتعددة والتي تتعلق بمعالجة وتخزين ونقل المعلومات السمعية والمرئية والتي تحتاج لسعات تخزينية كبيرة تفوق كثيرا السعة التخزينية التي تحتاجها المعلومات المقروءة. فإذا كانت الصفحة الواحدة من المعلومات المكتوبة تحتاج أربعة آلاف بايت لتخزينها فإن الثانية الواحدة من المعلومات السمعية غير المضغوطة تحتاج إلى أربع وستين ألف بت بينما تحتاج الثانية الواحدة من المعلومات المرئية غير المضغوطة إلى تسعين مليون بت. أي أن القرص المغناطيسي المرن يتسع لما يقرب من ثلاثمائة صفحة مكتوبة ولما يقرب من ثلاثة دقائق من المعلومات المسموعة ولما يقرب من عشر الثانية من المعلومات المرئية. وفي المقابل فإن القرص الضوئي الذي تبلغ سعته ستمائة وخمسون ميغابايت يتسع لمائة وخمسين ألف صفحة مكتوبة ولما يقرب من عشرين ساعة من المعلومات المسموعة غير المضغوطة ولما يقرب من دقيقة من المعلومات المرئية غير المضغوطة. ويتبين من هذه الأرقام أن الأقراص

الضوئية تبدو عملية بالنسبة للمعلومات المقروءة والمسموعة إلا أنها غير ذات جدوى للمعلومات المرئيـــة إذا لم يتم ضغطها بطريقة ما. وفي منتصف التسعينات بدأت الشركات الصانعة العمل علـــى تطـــوير أقـــراص ضوئية عالية السعة يمكنها تخزين الإشارات المرئية الرقمية وقد أطلق عليها اســـم الـــدي فـــي دي (DVD) اختصـارا لكلمات قرص الفيديو الرقمي (Digital Video Disk) وقد وصلت سعة أول أنواع هذه الأقراص إلى ما يقرب من خمسة جيقابايت أي سبعة أضعاف سعة القرص الضوئي العادي وتتوفر الآن في الأســـواق أقراص بسعة تصل إلى خمسة وعشرين ضعف سعة الأقراص الضوئية العادية أي سبعة عشر جيقابايت. لقد تم تحقيق هذا الإنجاز الكبير في زيادة سعة الأقراص الضوئية من خلال استخدام ليزرات ذات أطوال موجيـــة تقل عن تلك المستخدمة في سواقات الأقراص الضوئية العادية مما أدى إلى تقليل المسافة بين مسارات الكتابة على سطح القرص إلى نصف ما كانت عليه وبالتالي مضاعفة عدد المسارات في وحدة المساحة.

أما أحدث تقنيات التخزين الدائم والتي بدأت بالظهور في بداية التسعينيات فهي المسماة بالـــذاكرات الومضية (flash memories) وهي ذاكـــرات شـــبه موصـــلة (semiconductor memories) تســـتخدم الترانزستورات كخلايا للتخزين وتبقى محتفظة بالمعلومات المخزنة حتى عند فصل التيار الكهربـــائي عنهـــا. وهي تختلف عن ذاكرات القراءة فقط شبه الموصلة (semiconductor ROM) بأنه يمكن مسحها والكتابـــة عليها مباشرة من الحاسوب كما هـــو الحـــال مـــع الأقراص الصلبة. وبسبب حجمها الصغير الـــذي لا يتجاوز حجم الإصبع الصغير وكذلك بسبب سعاتها العالية فقد أدت إلى ظهور تطبيقات لم يكن لهـــا أن تتحقق بدونها كما في الكميرات الرقمية والهواتـــف الخلوية والمسجلات الســـمعية والمرئيـــة وكـــذلك استخدامها بدلا من القرص الصلب في الحواســـيب الحضنية (Laptops) للتخفيف من وزنها وغير ذلك من التطبيقات ذات الطبيعة المتحركـــة. وتســـتخدم الآن بكثرة كوسيلة تخزين متنقلة بدلا من الأقراص المرنة والضوئية لسهولة حملها وكذلك سرعة نقل البيانات منها وإليها من خلال منافذ (USB) بالإضافة إلى سعتها العالية والتي وصلت إلى عدة عشرات جيقـــاهيرتز فـــي بعض أنواعها.



ضغط وتعمية المعلومات (Data Compression & Encryption)

تعتبر تقنية ضغط المعلومات من أهم المواضيع التي تعالجها نظرية المعلومات حيث برزت حاجـــة ماسة لتقليل الحيز التي تحتله المعلومات في وسائل التخزين المختلفة وكذلك تقليل عرض النطاق التي تحتله الإشارات الحاملة للمعلومات عند إرسالها عبر قنوات الاتصالات المختلفة. وتعتمـــد جميـــع تقنيـــات ضـــغط المعلومات على حقيقة مهمة وهي أن التمثيل المباشر لمختلف أنواع المعلومات قـــد يحتـــوي علـــى تكـــرار (redundancy) كبير للرموز المستخدمة في تمثيلها. ولا يمكن في الغالب اكتشاف مثل هذا التكرار بـــالنظر المجرد بل لا بد من استخدام طرق رياضية متقدمة لاكتشاف مثل هذا التكرار وبالتالي التخلص منه. وتعتبـــر نظرية الاحتمالات من أهم النظريات الرياضية التي تعتمد عليه نظرية المعلومات وطرق ضغط المعلومـــات حيث أن العناصر الحاملة للمعلومات تخرج من مصادر المعلومات المختلفة بشكل احتمالي وعشوائي. ويمكن

من خلال دراسة هذه المصادر تحديد احتمالية حدوث كل عنصر من هذه العناصر بشكل منفرد أو بشكل جماعي من خلال تحديد احتمالية حدوث عنصر ما بالاعتماد على معرفة العناصر التي سبقته في الحدوث وهو ما يسمى بالاحتمالات المشتركة أو الشرطية (joint & conditional probabilities). ومن خلال استخدام الاحتمالات المفردة والمشتركة لمصدر المعلومات يمكن تحديد ما يسمى بأنتروبيا المصدر (source entropy) والتي تمثل الحد الأدنى من عدد الرموز التي يمكن تمثيل المعلومات بها حيث لا يمكن ضغط المعلومات إلى ما دون هذا الحد إلا من خلال التضحية بجزء من المعلومات. وبعد أن يتم تحديد انتروبيا المصدر يبدأ العلماء بالبحث عن طرق مختلفة يمكنهم بها ضغط المعلومات واضعين نصب أعينهم الوصول لأقصى درجات الضغط.

وقد تمكن العلماء منذ الخمسينات من تطوير عشرات الطرق لضغط مختلف أنواع المعلومات حيث بدأت بضغط النصوص الكتابية في الستينات ثم ضغط الرسوم والصور في السبعينات والمعلومات السمعية والمرئية في الثمانينات. وتعتمد كفاءة الضغط على نوع المعلومات وعلى النموذج الذي يتم به تمثيل مصدر المعلومات من حيث معرفة الاحتمالات المفردة والمشتركة لعناصره المختلفة. ولقد بلغت نسبة الضغط في الوقت الحالي إلى الثلث في النصوص الكتابية وإلى العشر في الرسوم وإلى خمسة بالمائة في الصور الساكنة وذلك باستخدام طرق ضغط لا يتم فيه فقد أي جزء من المعلومات مثل طريقة هوفمان (Huffman) التي ظهرت في الخمسينات وطريقة لمبل-زف (Lempel-Ziv) التي ظهرت في السبعينات. أما الطرق المستخدمة في ضغط المعلومات السمعية والمرئية فهي من النوع الذي يسمح بالتخلي عن بعض المعلومات غير المهمة وذلك مقابل الحصول على نسب ضغط عالية شريطة أن لا تتأثر نوعية المعلومات المسترجعة نتيجة هذا الفقد. ولقد تم تطوير طرق معقدة لضغط المعلومات السمعية والمرئية وقد بلغت نسب ضغط المعلومات السمعية والمرئية إلى ما دون عشرة بالمائة.

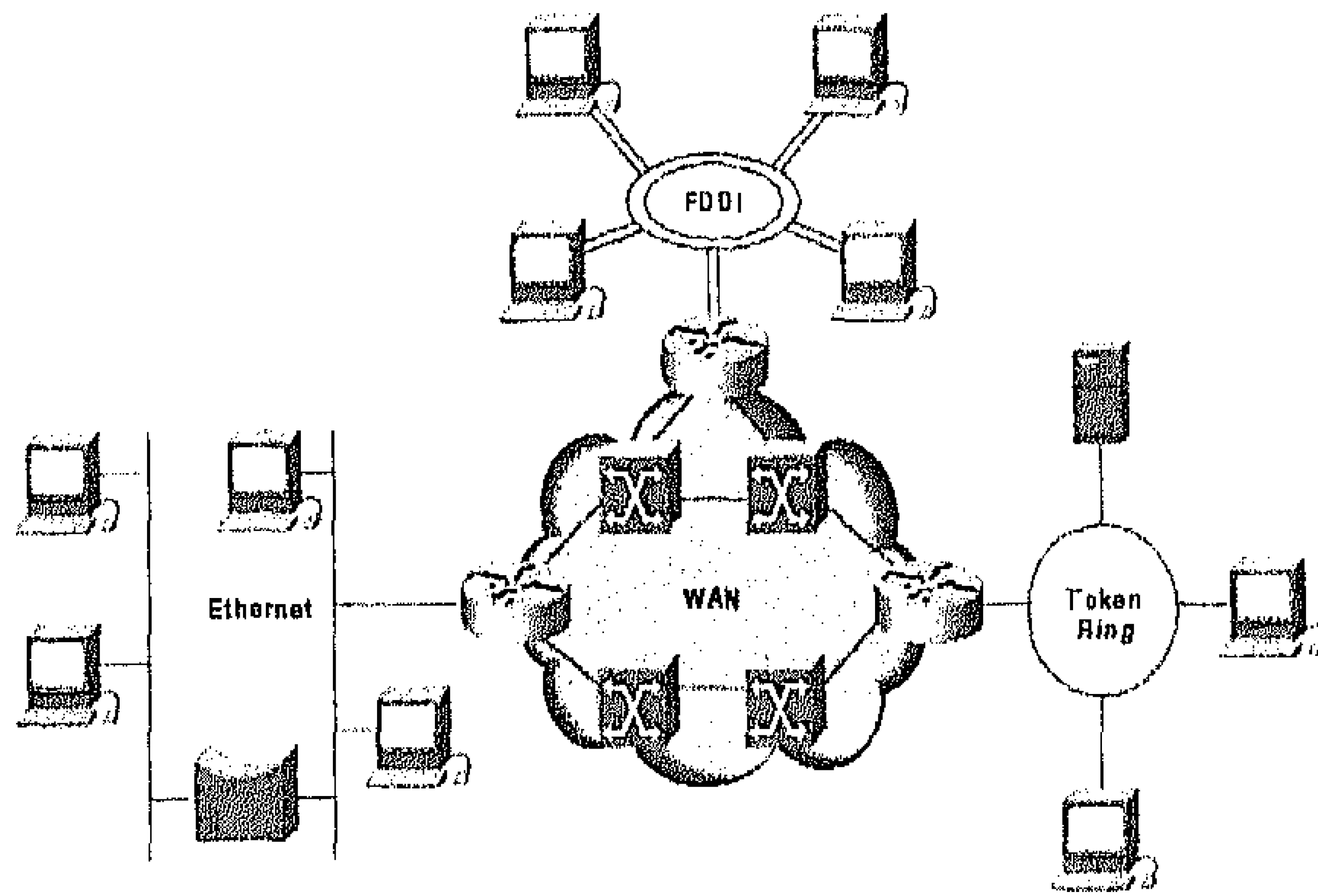
ومن أشهر برامج الضغط المستخدمة في ضغط الإشارات السمعية عالية الدقة (high fidelity) البرنامج المسمى ((MPEG-1 audio layer 3 (MP3)) وهو قادر على ضغط الإشارة السمعية الرقمية عالية النقاء من 1400 كيلوبت في الثانية إلى قيم تتراوح بين 32 و 320 كيلوبت في الثانية. أما برامج الضغط المستخدمة في ضغط الإشارات المرئية فهي كثيرة ومن أشهرها البرنامج المسمى (MPEG-2) وهو قادر على ضغط الإشارة المرئية الرقمية من ما يزيد عن مائة ميجابت في الثانية إلى قيم تتراوح بين 300 كيلوبت في الثانية و 10 ميجابت في الثانية وذلك على حسب درجة وضوح الصورة المطلوبة. لقد أدت الإنجازات الكبيرة في طرق ضغط المعلومات إلى تسهيل حركة المعلومات في شبكات المعلومات المختلفة بشكل كبير ففي مجال الأقمار الصناعية تمكن المهندسون من بث عشرات القنوات التلفزيونية الرقمية على المستجيب القمري الواحد بعد أن كان لا يتسع لأكثر من قناة تلفزيونية تماثلية واحدة وفي شبكات الهواتف الخلوية تم زيادة عدد المكالمات الهاتفية المرسلة عبر نفس النطاق الترددي إلى عدة أضعاف وفي وسائل تخزين المعلومات الحاسوبية تم مضاعفة كمية المعلومات المخزنة على الأقراص المغناطيسية والضوئية.

إن أحد أهم ميزات المعلومات الرقمية هو سهولة تشفيرها بحيث يمكنها التغلب على بعض المشاكل التي قد تواجهها أثناء نقلها عبر قنوات الاتصال أو أثناء تخزينها في وسائط التخزين المختلفة. ومن أهم هذه المشاكل حدوث أخطاء في المعلومات عند نقلها عبر قنوات الاتصال المختلفة نتيجة لتعرضها للضوضاء أو الضجيج الكهربائي والتي تتداخل مع الإشارات الكهربائية الحاملة للمعلومات. وتتم عملية التشفير في هذه الحالة من خلال إضافة عدد محدد من البتات وبطريقة مدروسة على الكلمات الرقمية التي تمثل المعلومات

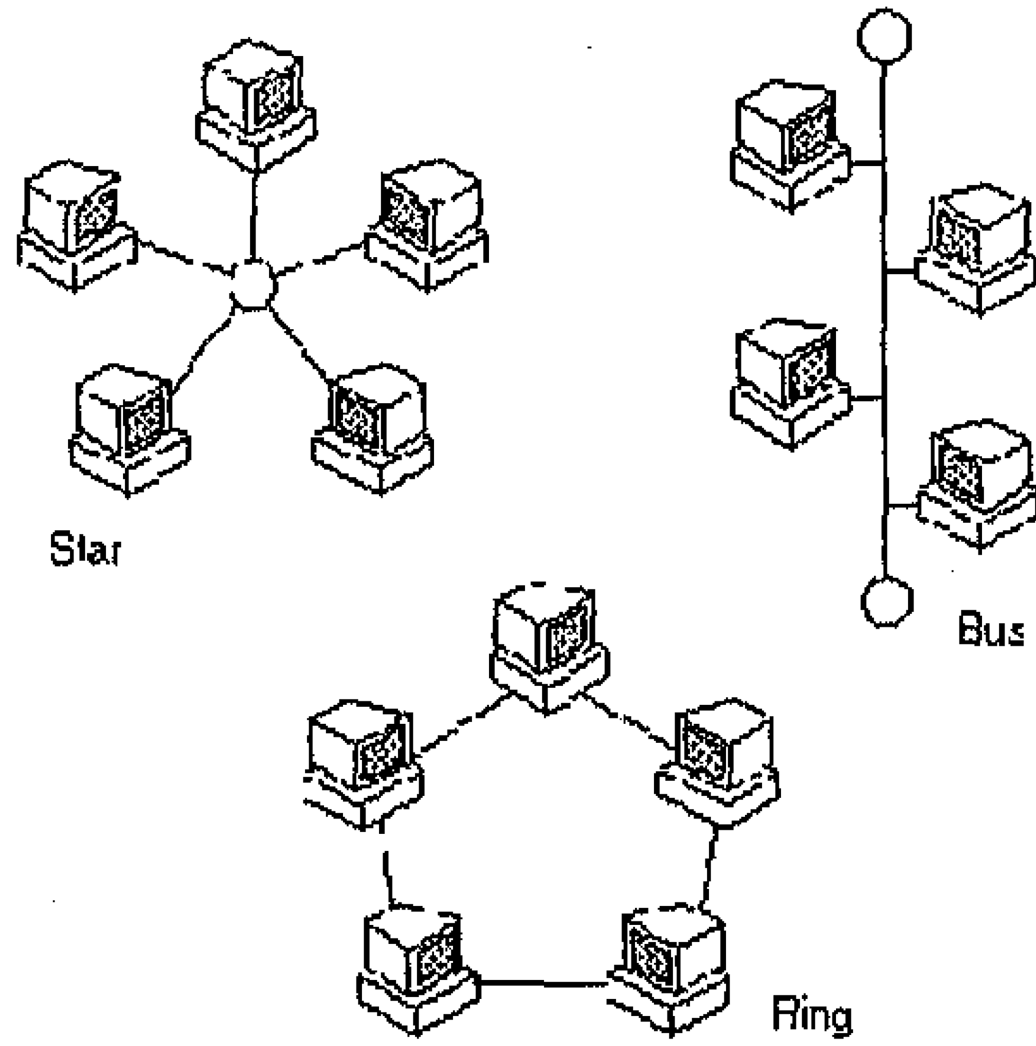
الأصلية بحيث يمكنها المساعدة في اكتشاف وتصحيح الأخطاء. وقد تمكن العلماء من اختراع عدد كبير من الطرق التي يمكن بها تشفير المعلومات فهنالك المشفرات التي يمكنها تصحيح خطأ واحد فقط في كلمة المعلومات وهذا هو أكثر الأنواع شيوعا في الاستخدام. وهناك المشفرات التي يمكنها تصحيح خطأين أو أكثر في الكلمة الواحدة إلا أن استخدام هذه الأنواع يزيد من عرض النطاق الترددي التي تحتله الإشارات المشفرة ويزيد كذلك الوقت اللازم لفك الشيفرات. لقد ساعدت طرق التشفير هذه في تحسين أداء مختلف أنواع أنظمة الاتصالات فلولاها لما أمكن استرجاع المعلومات التي تبثها المركبات الفضائية التي تم إرسالها إلى كواكب المجموعة الشمسية حيث أن عملية تصميم هذه الأنظمة في غاية الصعوبة بسبب بعد المسافة عن الأرض التي قد تصل لمئات الملايين من الكيلومترات وبسبب قلة الطاقة الكهربائية المتوفرة على هذه المركبات وفي أنظمة اتصالات الأقمار الصناعية ساعدت أنظمة التشفير على تقليل كمية الطاقة التي تبثها معدات الإرسال وذلك بسبب إمكانية مقايضة الطاقة مع عدد الأخطاء التي يمكن لأنظمة التشفير تصحيحها أي أنه يمكن تقليل الطاقة من خلال زيادة عدد الأخطاء المصححة.

ومن الأهداف الأخرى للتشفير هو الحفاظ على سرية المعلومات المنقولة أو المخزنة والحيلولة دون الإطلاع عليها أو العبث بها من قبل غير مالكيها حيث أن كثيرا من المعلومات المتداولة في هذا العصر ذات أهمية بالغة وقد يسبب العبث بها من قبل غير المعنيين خسارة كبيرة لمالكيها. ولقد كانت الجيوش أكثر المستخدمين لهذا النوع من التشفير وخاصة أثناء الحروب حيث يتطلب نقل الرسائل العسكرية بين القيادة والوحدات والأفراد سرية تامة وقد يؤدي الإطلاع على هذه الرسائل خسائر فادحة في الأرواح والمعدات. وقد تم استخدام الطرق اليدوية وبعض الآلات الحاسبة لإجراء عمليات التشفير وفك التشفير قبل أن يتم استخدام الحواسيب الإلكترونية لمثل هذه الأغراض. ولم يقتصر استخدام تشفير المعلومات على التطبيقات العسكرية بل انتشر استخدامها بشكل واسع في كثير من التطبيقات المدنية فعلى سبيل المثال فإن معظم الحسابات والمعاملات المالية في البنوك والمصارف المالية يتم تخزينها ومعالجتها باستخدام الحواسيب المرتبطة ببعضها من خلال شبكات الحواسيب. وإذا ما استطاع شخص غير مخول من الدخول إلى هذه الشبكات الحاسوبية والبرامج التي تحتويها فقد يقوم بإتلاف هذه البرامج أو تغيير محتوياته لصالحه أو لصالح بعض الجهات. وكذلك قد يؤدي تغيير محتوى الوثائق التي تملكها الشركات التجارية والصناعية والحكومات الإلكترونية والمخزنة في الحواسيب أو المرسلة عبر وسائل الاتصالات المختلفة إلى خسائر فادحة. ولهذا فقد انصب جهد خبراء المعلومات على البحث عن طرق يمكن بها الحفاظ على سرية هذه المعلومات والحيلولة دون السطو عليها من قبل غير مالكيها. وقد تمكن العلماء من تطوير كثير من البرامج التي تقوم بتشفير المعلومات قبل تخزينها في الحواسيب أو نقلها عبر قنوات الاتصالات بحيث لا يمكن لغير المعنيين الوصول لهذه المعلومات إلا من خلال استخدام برامج تقوم بفك الشيفرة المستخدمة. وتتفاوت طرق التشفير المستخدمة تفاوتا كبيرا في تعقيدها ومدى سرية المعلومات المشفرة فهنالك أنواع بسيطة يمكن فك شيفرتها في وقت قصير وببرامج بسيطة يتم تنفيذها على الحواسيب الشخصية وهنالك أنواع بالغة التعقيد لا يمكن فك شيفرتها إلا باستخدام الحواسيب العملاقة.

7-10 شبكات الحاسوب والإنترنت (Computer Networks & the Internet)



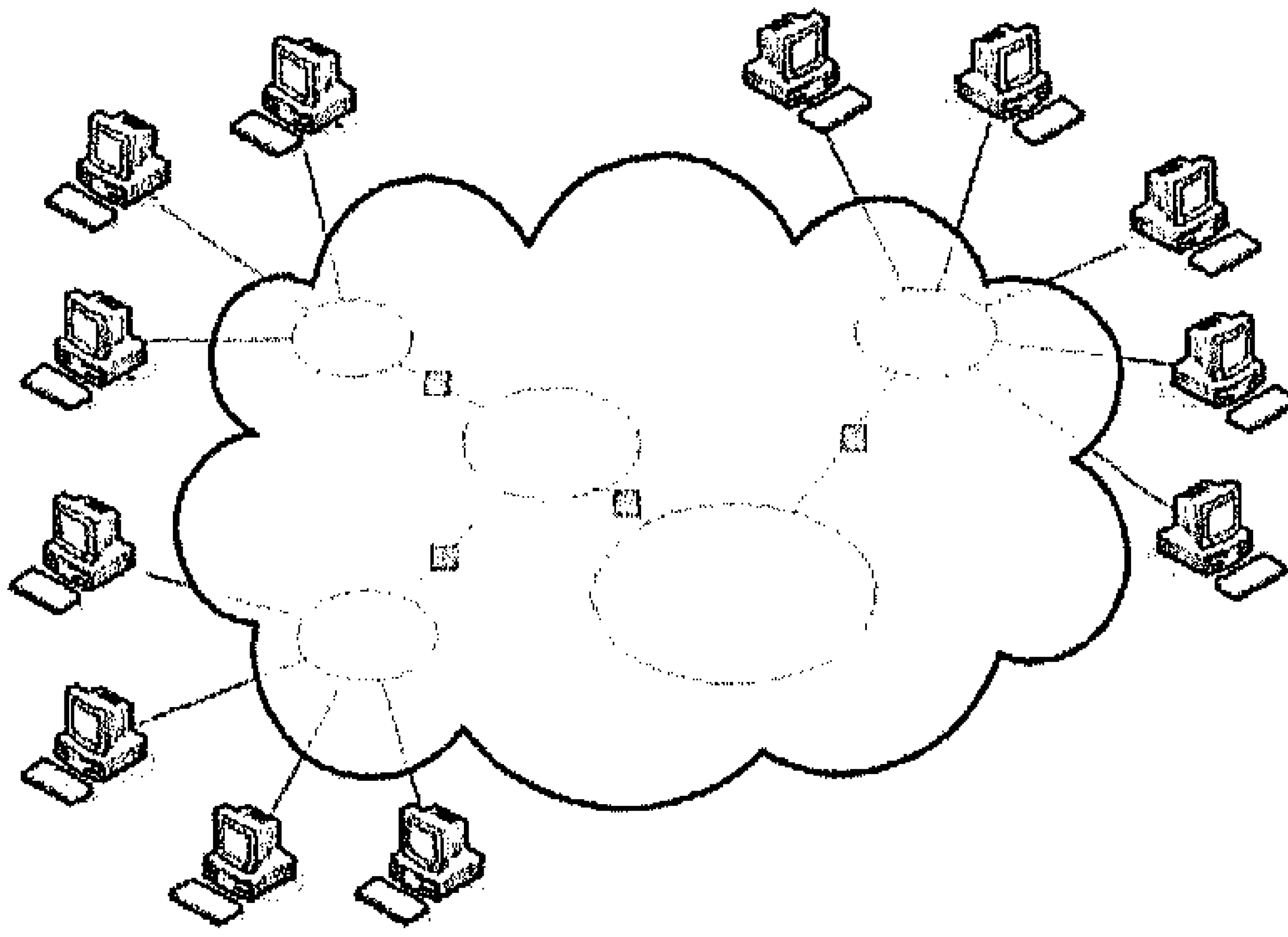
تتكون شبكة المعلومات من عدد كبير من المشتركين الذي يمكن لأي منهم الاتصال بأي مشترك آخر على الشبكة لتبادل المعلومات معه شريطة أن يكون لكل مشترك عنوانه المحدد. وتتكون الشبكة من الأجهزة الطرفية (terminals) للمشتركين ومن مراكز التبديل (switching centers) التي تعمل على تأمين قناة الاتصال المناسبة لربط المشترك الطالب مع المشترك المطلوب ومن أنظمة التراسل (transmission systems) التي تربط المشتركين مع مراكز التبديل وتربط مراكز التبديل مع بعضها البعض. يتم توفير قناة الاتصال على الشبكة بناءا على طلب أحد المشتركين من خلال إرسال إشارات تحكم من جهازه الطرفي على شكل سلسلة من الأرقام أو الأحرف إلى أقرب مركز تبديل ليقوم بترجمة هذه الإشارات التي تعمل على إغلاق المفاتيح اللازمة لإيصال المشترك للوجهة التي يريدها. وتستخدم مراكز التبديل إحدى طريقتين لتأمين قناة الاتصال المطلوبة وهما التبديل الداراتي (circuit switching) والتبديل الرزمي (packet switching) ففي التبديل الداراتي والمستخدم في الشبكات الهاتفية يتم إغلاق سلسلة من المفاتيح في مقاسم التبديل المختلفة للحصول على قناة الاتصال اللازمة والتي تبقى محجوزة طول فترة المكالمة بغض النظر عن نسبة إشغالها والتي لا تتجاوز الخمسين بالمائة في المكالمات الصوتية. أما التبديل الرزمي والذي ظهر في بداية الستينات كنظام تبديل مناسب لشبكات الحواسيب فإنه يتميز بنسبة إشغال عالية ويستخدم الحواسيب بدلا من المقاسم في إجراء عملية التبديل. يقوم الحاسوب في هذا النوع بتجزئة الرسالة (message) إلى عدد من الرزم (packets) يحوي كل منها على جزء من معلومات الرسالة الأصلية بالإضافة إلى عنوان الطالب والمطلوب والرقم التسلسلي للرزمة ثم يقوم بإرسالها على التوالي إلى أقرب حاسوب مرتبط معه والذي يقوم بدوره بتمريرها إلى حاسوب آخر وتظل الحواسيب تتقاذفها إلى أن تصل لعنوانها المطلوب. ونظرا للتأخير الزمني العشوائي الذي تعاني منه أنظمة التبديل الرزمي فقد تعذر استخدامها في نقل المكالمات الهاتفية ولذلك فقد تم حديثا تطوير أنواع من التبديل تجمع بين نوعي التبديل الدارتي والرزمي قادرة على نقل مختلف أنواع المعلومات المرئية والصوتية والبيانية وذلك بعد تحويلها إلى إشارات رقمية. ومن أشهر هذه الأنواع ما يسمى بنمط الإرسال اللامتزامن (ATM) والذي يتكون من رزم ثابتة الطول ترسل تباعا بمعدل يعتمد على سعة قناة الإرسال.



وتصنف شبكات الحواسيب من حيث حجم التغطية إلى ثلاثة أنواع رئيسية وهي شبكات المنطقة المحلية (Local Area Networks (LAN)) وهي عبارة عن شبكة تربط مجموعة من الحواسيب ضمن منطقة صغيرة كداخل بنك أو جامعة أو شركة أو غير ذلك من المؤسسات وشبكات المنطقة الحضرية (Metropolitan Area Networks (MAN)) وهي شبكة تربط مجموعة شبكات محلية ضمن نطاق مدينة واحدة وشبكات المنطقة الواسعة (Wide Area Networks (WAN)) والتي تربط مجموعة من الشبكات المحلية أو الحضرية موزعة في مدن أو دول مختلفة. ويوجد ثلاث طرق أساسية لوصل الحواسيب مع بعضها البعض وهي توصيلة النجمة (Star) وتوصيلة المسار (Bus) وتوصيلة الحلقة (Ring).
بدأ العمل على تطوير شبكات الحواسيب في الستينات بعد أن قامت وزارة الدفاع الأمريكية بدعم مجموعة باحثين لدراسة أنجح السبل للحفاظ على أدنى قدر من التراسل بين مراكز معلوماتها فيما لو تعرض بعضها للدمار في حالة الحرب. وقد تم اقتراح بناء شبكة معلومات يكون التحكم فيها موزعا على جميع عقد الشبكة (network nodes) وتم استخدام التبديل الرزمي لنقل المعلومات حيث يتم إرسال الرزم إلى أقرب عقدة مجاورة تقع في اتجاه العنوان المطلوب فتقوم بدورها بقذفها لعقد أخرى في الشبكة حتى تصل إلى العقدة النهائية التي تقوم بتجميع الرزم لاسترجاع الرسالة الأصلية. وفي عام 1969م تم بناء أول شبكة من هذا النوع أطلق عليها اسم أربانت (ARPANET) لربط مجموعة من الحواسيب الفائقة السرعة وبدأت هذه الشبكة بالتوسع حتى وصل عدد العقد في عام 1972م إلى 37 عقدة وزامن ذلك ظهور شبكات حاسوبية أخرى كشبكة الإيثرنت (ETHERNET) في عام 1974م المستخدمة في الجامعات ومراكز الأبحاث وشبكة اليوزنت (USENET) في عام 1979م وشبكة البتنت (BITNET) في عام 1981م ولكن بقيت كل منها مستقلة عن الأخرى. وفي عام 1980م بدأ العمل على ربط هذه الشبكات غير المتجانسة مع بعضها لإنشاء ما يسمى بشبكة الشبكات (Network of networks) أو الإنترنت (INTERNET) وتم استخدام برتوكول ربط جديد تم تطويره في عام 1977م وهو برتوكول الإنترنت (TCP/IP). ومع ظهور الحواسيب الشخصية في الثمانينات وتزايد شبكات الحواسيب المحلية بدأت شبكة الإنترنت بالتوسع حتى وصل عدد العقد فيها إلى عشرة آلاف عقدة في عام 1989م واقتصر استخدامها على العلماء والباحثين وطلبة الجامعات لنقل الملفات والبرامج والبريد الإلكتروني.

أما ثورة الإنترنت الحقيقية فقد بدأت من المختبر الأوروبي لفيزياء الجسيمات بعد أن اقترح أحد باحثيه وهو عالم الحاسوب الإنكليزي تيموثي لي (Timothy Berners-Lee) طريقة فريدة للوصول إلى المعلومات المبعثرة في مواقع شبكة الإنترنت من خلال ما يسمى بنظام التصفح (browser). ويمكن للمستخدم من خلال المتصفح الوصول إلى ما يريده من معلومات من خلال التأشير والنقر بالفأرة على كلمات معينة موجودة على الصفحة المعروضة على شاشة الحاسوب فتأتي له بصفحات جديدة. وتمكن هذا الباحث في عام 1990م من تطوير أول برتوكول للتصفح وفي عام 1992م تم إنشاء أول موقع للتصفح أو ما سمي بخادم الشبكة (network server) مؤذنا بميلاد ما يسمى بشبكة المعلومات العالمية أو الشبكة العنكبوتية (World Wide Web (WWW)). وفي عام 1995م تم تطوير متصفحات تجارية عالية الكفاءة مما أدى إلى تزايد أعداد المشتركين مع شبكة الإنترنت بشكل غير متوقع حيث ارتفع عدد المشتركين من مائة ألف في عام 1989م إلى مليون في عام 1993م ومليونان في عام 1994م وستة ملايين في عام 1995م وأربعة عشر مليون في 1996م واثنان وعشرون مليون في عام 1997م وثلاثون مليون في عام 1998م وثلاثة وأربعون مليون في عام 1999م ووصل العدد إلى ألف مليون مستخدم في عام 2005م. تتكون شبكة

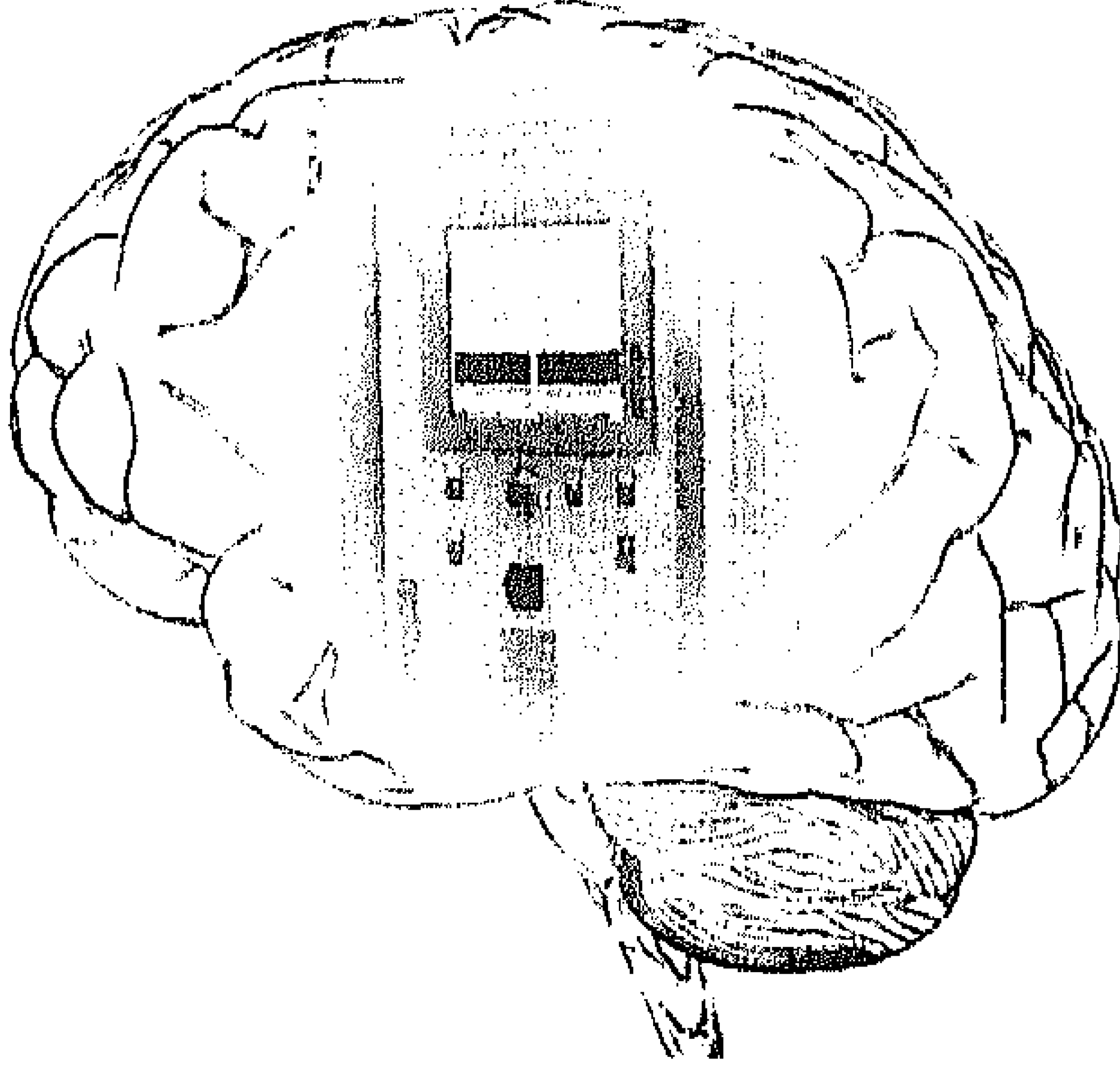
الإنترنت من عدد ضخم من الشبكات المحلية ومواقع المعلومات التي تتراسل فيما بينها من خلال حواسيب ذات إمكانات متقدمة تسمى البوابات تقع عليها مسئولية إرسال واستقبال رزم المعلومات. ويتم ربط هذه الشبكات والمواقع باستخدام أنظمة اتصالات خاصة أو من خلال شبكات الهواتف العامة التي سهلت بشكل كبير انتشار خدمة الإنترنت وخاصة لمشتركي المنازل الذين يستخدمون خط الهاتف للتراسل مع مواقع الشبكة. ومع تزايد الطلب على خدمة الإنترنت والذي يتوقع له أن يتضاعف كل ثلاثة أشهر أصبحت الحركة الناتجة عن خدمة الانترنت على خطوط التراسل في الشبكة الهاتفية العامة تنافس الحركة الهاتفية مما دفع بكثير من الشركات في بناء أنظمة اتصالات عملاقة مثل كبلات الألياف الضوئية البرية والبحرية التي تربط القارات والدول مع بعضها البعض ومثل منظومات الأقمار الصناعية التي ستعمل على نقل الحركة الناتجة عن الإنترنت إلى جانب تقديم هذه الخدمة مباشرة من الأقمار الصناعية إلى المنازل. ومن هذه المشاريع العملاقة مشروع تليديسك التي سيضع 288 قمرا صناعيا في 12 مدارا أرضيا منخفضا على ارتفاع 375 كيلومتر وهنالك عدة مشاريع لاستخدام أقمار صناعية متزامنة يكفي ثلاثة منها لتغطية معظم سطح الأرض. تقدم شبكة الإنترنت لمستخدميها عدد لا حصر له من الخدمات كخدمة البريد الإلكتروني (email) التي تتيح للمستخدم إرسال رسائله إلكترونيا إلى أي مشترك آخر على الشبكة وخدمة الدردشة أو الرسائل الآنية (instant messaging) وخدمة تبادل الملفات (file sharing) وخدمة إجراء المكالمات الهاتفية (Voice over IP). وكذلك خدمة التجارة الإلكترونية التي تتيح للصناع والتجار عرض منتجاتهم وبضائعهم من خلال الشبكة وتمكن الزبائن من التجول في هذه الأسواق الإلكترونية ومقارنة البضائع المعروضة. أما الخدمة الكبرى فهي خدمة البحث والتصفح في شبكة المعلومات العالمية (World Wide Web (WWW)) والتي تمكن المستخدم من الوصول إلى عدد لا حصر له من المواقع التي تحوي على مختلف أنواع المعلومات العلمية والصناعية والطبية والثقافية والفنية والترفيهية والرياضية والإخبارية والسياحية والتجارية. ويحتاج البحث في الإنترنت ما يسمى بمحركات البحث (search engines) وقد ظهر أول وأشهر نوعين منها في عام 1995م وهما محرك ياهو (Yahoo) وألتافيزتا (Altavista) ثم ظهر محرك بحث جوجل (Google) في عام 1998م. ويحتاج المستخدم للإنترنت ما يسمى بمتصفح الشبكة (web browser) وكان المتصفح (Netscape) والمتصفح (Internet Explorer) أول ما ظهر من المتصفحات في عام 1995م ثم ظهرت سلسلة من المتصفحات كمتصفح (Mozilla) في عام 1999م ومتصفح (FireFox) في عام 2004م.



الفصل الثامن

أنظمة التحكم

8-1 تمهيد



نظام التحكم هو عبارة عن أجهزة أو مكونات تعمل على إدارة نظام معين بحيث تمكنه من القيام بوظيفته على الوجه الذي أراده له من قام بتصميم النظام المتحكم به. فالأنظمة في الغالب تتكون من مجموعة من المكونات كل منها يقوم بوظيفة جزئية معينة ويجب أن تتكامل هذه الوظائف الجزئية لكي يقوم النظام بالوظيفة الكلية المنوطة به. وتقع مسؤولية حفظ هذا التكامل على نظام التحكم الذي هو في الغالب جزء مدمج في النظام الكلي. إن أعقد أنظمة التحكم موجودة وبعدد لا يحصى في الكائنات الحية وهي أوضح ما تكون في الإنسان وبقية الحيوانات رغم أن أنظمة التحكم غير الظاهرة الموجودة في خلايا وأجسام الكائنات الحية نباتاتها وحيواناتها من التعقيد بحيث لا زال العلماء يجهلون كثيرا من آليات عملها. وسنسوق بعض الأمثلة على أنظمة التحكم الطبيعة خلال الشرح وذلك لتوضيح بعض المفاهيم الأساسية في نظرية التحكم علما بأن كثيرا من أنظمة التحكم الصناعية قد استوحاها المهندسون من أنظمة التحكم الطبيعية. فعلى سبيل المثال فالشخص عندما يقوم بالتقاط جسما ما بيده فإن عملية الالتقاط هذه تحتاج لنظام تحكم بالغ التعقيد يتبين لنا مدى تعقيده عندما نشاهد الجهد البالغ الذي يبذله المهندسون لتصميم إنسان آلي قادر على التقاط الأجسام بيده الصناعية. فعملية التقاط الأشياء التي تقوم بها اليد البشرية تتم من خلال قيام العين بتزويد الدماغ بمجموعة من الصور عن مكان ذلك الشيء وحجمه وشكله ثم يقوم الدماغ بتشغيل برنامج معقد يقوم بتحريك عدد كبير من عضلات اليد بطريقة محددة تنتهي بالإمساك بالشيء بالطريقة المناسبة وذلك حسب حجمه وشكله. وفي نظام التحكم بدرجة حرارة أجسام ذوات الدم الحار من الحيوانات فإن خلايا عصبية معينة موجودة في مختلف أجزاء جسم الحيوان تقوم بتزويد الدماغ بدرجة حرارة الجسم وإذا ما قلت أو زادت عن درجة حرارة معينة وهي 37 درجة في الإنسان فإن الدماغ يصدر أوامره لأجهزة معينة في الجسم لاتخاذ الإجراءات المناسبة التي تعمل على إعادة درجة الحرارة لوضعها الطبيعي. وكذلك هو الحال في أنظمة التحكم المسؤولة عن حفظ مستوى ضغط الدم وعن مستوى السكر أو غيره من المكونات الموجودة في الدم والتي توجد لها برامج تحكم مخزنة في الدماغ.

لقد ظهرت الحاجة لأنظمة التحكم الصناعية منذ اختراع الإنسان للآلات الميكانيكية ومن ثم الآلات الكهربائية والأجهزة الإلكترونية. وإذا كانت المحركات بمختلف أنواعها ابتداء بالآلة البخارية وانتهاء بالمحرك الكهربائي قد حلت محل عضلات الإنسان والحيوان لإنتاج القوة الميكانيكية فإن أنظمة التحكم قد حلت محل بعض وظائف عقله. ولذلك فقد استخدم الإنسان المحركات وأنظمة التحكم الصناعي لتحل محله في

كثير من عمليات الإنتاج وبذلك أراحته من عناء القيام بكثير من المهام ووفرت عليه الوقت ليقوم بوظائف أخرى أكثر راحة. فعلى سبيل المثال فإن تعبئة خزان من الماء من شبكة المياه العامة كان يتطلب من الشخص الصعود إلى الخزان ومراقبة عملية التعبئة من البداية إلى النهاية والتي قد تستغرق وقتا طويلا وذالك لكي يقوم بإغلاق محبس الماء عند امتلاء الخزان ولكن بوجود نظام تحكم ميكانيكي بسيط كالعوامة لم يعد من اللازم أن يتدخل الشخص أبدا في عملية تعبئة الخزان. فالعوامة كنظام تحكم ميكانيكي غاية في البساطة أراحت الإنسان من كثير من العناء ووفرت عليه وقتا طويلا يمكن استغلاله للقيام بوظائف أخرى. وباستخدام أنظمة التحكم تمكن الإنسان من تجنب التواجد في الأماكن الصناعية التي تجري فيها عمليات قد تكون خطرة على حياته كما في مصانع الكيميائيات ومصافي البترول وفي المحطات الكهروذرية وفي المناجم وغيرها الكثير. ولقد ساعدت أنظمة التحكم الإنسان على بناء أجهزة ومعدات تقوم بعمليات مختلفة دون توقف وبسرعة عالية جدا وبأدنى تدخل من الإنسان كما في المصانع التي تحتوي على خطوط الإنتاج والتجميع والتغليف والتي تنتج كميات كبيرة جدا من المنتجات بمختلف أنواعها. إن الأسعار المتدنية جدا للمنتجات يعود الفضل فيها لأنظمة التحكم أولا وللمحركات الكهربائية ثانيا وللآلات الميكانيكية ثالثا حيث أن إنتاج قطعة ما كمسمار أو برغي من قبل الإنسان باستخدام الآلات الميكانيكية فقط يتطلب منه جهدا عضليا ووقتا طويلا قد يستغرق الساعات وإذا ما استعان بالمحركات الكهربائية فسيقل الجهد العضلي الذي سيبذله بشكل كبير وقد يتقلص وقت الإنتاج إلى النصف. أما إذا ما استخدم نظام التحكم الآلي لتصميم آلات تدار بالمحركات ويتم برمجتها للقيام بكامل خطوات التصنيع فإن الإنسان لن يبذل أي جهد وقد تنتج هذه الآلات مئات أو ربما آلاف القطع في الدقيقة الواحدة. وليتخيل القارئ كم سيكون سعر المسمار أو البرغي الواحد لو تم تصنيعه من قبل الإنسان بل عليه أن يتخيل كم سيكون عدد البشر وكذلك عدد الآلات التي تلزم لإنتاج مسامير وبراغي بالمعدل الذي تنتج فيه الآن! وباستخدام أنظمة التحكم أصبح بالإمكان تصنيع أجهزة ومعدات تقوم بوظائف لا يمكن للإنسان أن يقوم بها إما بسبب كثرة خطوات إجرائها أو تكرارها بشكل متواصل أو لقصر الفترة الزمنية بين الخطوة والتي تليها. فعلى سبيل المثال لا يمكن للإنسان أن يتحكم بصاروخ حربي لكي يصيب هدفه أو في قمر صناعي أو في مركبة فضائية أو في آلة تصوير تلتقط مئات الصور في الدقيقة أو في جهاز هاتف خلوي يستطيع أن يحدد الترددات المتاحة في أقل من ثانية أو في غير ذلك من التطبيقات.

لا يكاد يخلو اليوم جهاز مهما بلغت بساطة وظيفته من نظام تحكم يعتمد تعقيده على وظيفة الجهاز المستخدم فيه ولقد حولت أنظمة التحكم كثيرا من الأجهزة والمعدات إلى أنظمة ذكية جنبت الإنسان العناء الذي كان يواجه عند تشغيلها. فعلى سبيل المثال فإن عملية التحكم باختيار قنوات التلفزيون قبل ثلاثين عاما كانت تتم بشكل يدوي من قبل المشاهد وعليه أن يقوم من مقامه ويذهب إلى التلفزيون كلما أراد أن يغير القناة أو يغير مستوى الصوت ولكن مع اختراع المتحكمات السلكية ومن ثم اللاسلكية أصبح بإمكانه القيام بهذه المهمة وهو في مكانه. ولقد كان للمتحكمات الدقيقة (microcontrollers) التي ظهرت في بداية الثمانينات من القرن العشرين والتي تتميز بصغر حجمها وقلة استهلاكها للطاقة الفضل الأكبر في تحويل معظم الأجهزة والمعدات إلى أجهزة ذكية. ففي المنازل الحديثة يوجد عدة عشرات من المتحكمات وقد تصل لعدة مئات في القريب العاجل قامت بتحويل معظم الأجهزة المنزلية إلى أجهزة ذكية وفرت وقت وجهد مستخدميها كما في الغسالات والمكيفات والثلاجات والجلايات ومحضرات الطعام وغيرها. وفي المركبات الحديثة يوجد عشرات المتحكمات التي ساعدت في تحسين أداء محركاتها وقللت من مستوى تلويثها للبيئة وقللت كذلك كثيرا من الجهد الذي كان يبذله سائقيها كالتحكم بالنوافذ والمرايا والمقاعد والأضوية والراديو والمسجلات والهوائيات

من خلال كبس الأزرار. ولا يمكن حصر مجالات استخدام المتحكمات فهي موجودة كما ذكرنا سابقا في الغالبية العظمى من الأجهزة والمعدات الحديثة المستخدمة في المصانع وفي مصافي البترول ومحطات التوليد ومصانع الأدوية وفي المركبات والآليات والطائرات والقطارات والأجهزة الطبية وأجهزة الاتصالات والحواسيب والأقمار الصناعية والمركبات الفضائية والأجهزة المخبرية والعلمية والألعاب وغير ذلك الكثير.

2-8 تاريخ أنظمة التحكم

وجدت أنظمة التحكم في الكائنات الحية منذ أن خلقها الله وبأنواع وأعداد لا حصر لها وبتعقيد لا زال العلماء يجهلون كثير من آليات عملها فلا يكاد يخلو جسم كائن حي من عدد كبير جدا من أنظمة التحكم التي تساعد جسمه على القيام بوظائفه المختلفة على الوجه الأكمل. ففي داخل الخلية الحية والتي هي وحدة بناء أجسام جميع أنواع الكائنات الحية تجري عمليات حيوية لا حصر لعدد أنواعها وتحتاج هذه العمليات الكيميائية لأنظمة تحكم معقدة تحدد سير هذه العمليات وما ينتج عنها من مواد عضوية ومكونات خلوية. وفي الكائنات الحية المتحركة توجد أنظمة تحكم بالغة التعقيد لا زال العلماء يجهلون كثيرا من أنواعها وكذلك آليات عمل الأنواع التي تعرفوا عليها. فجميع الحشرات والزواحف والطيور والأسماك والثدييات تحتاج لأنظمة تحكم بالغة الدقة تحفظ لها توازنها أثناء حركتها في البر والبحر والجو وتتفاوت هذه الأنظمة في تعقيدها فهي أعقد ما تكون في الطيور ومن ثم في تلك التي تمشي على رجلين وتلك التي تمشي على أربع أو أكثر وتلك التي تزحف على بطنها وتلك التي تسبح في الماء. فنظام التحكم المستخدم في حفظ توازن جسم الإنسان على سبيل المثال فيه من التعقيد ما لا يعلمه إلا الله فلكي يبقى الجسم في وضع الاتزان يجب أن يقع مسقط مركز ثقله ضمن المساحة التي تلامس بها القدمين الأرض وذلك في مختلف الأوضاع التي يتخذها الجسم إما واقفا أو ماشيا أو راكضا أو لاعبا أو قائما بأعمال بهلوانية أو غير ذلك. ولكي يحافظ نظام التحكم على اتزان الجسم فيجب تزويده بآلاف الإشارات المتواصلة وليس بإشارات معدودة كما في أنظمة التحكم الصناعية بعضها يأتي من الأذن الوسطى وبعضها من العينين والبقية من عضلات الجسم التي في الرجلين واليدين والظهر والرأس والرقبة ومن ثم تقوم برمجيات معقدة مخزنة في الدماغ بتحليل هذه الإشارات ومعرفة وضعية الجسم في كل لحظة زمنية وبالتالي إرسال إشارات بشكل متواصل لعضلات الجسم المختلفة لتشتد أو ترتخي بحيث تضمن عدم سقوط جسم الإنسان إلى الأرض. وهناك أنظمة تحكم معقدة لتنظيم درجة حرارة أجسام الحيوانات ومعدل دقات قلوبها ومستويات المواد المختلفة في دمائها وبقية أجزاء جسمها وإلى غير ذلك من الأنظمة التي لا يعلم عدد أنواعها وطريقة عملها إلا من صممها سبحانه وتعالى. ومن الأمثلة الدالة على بديع صنع الله في أنظمة التحكم المستخدمة في الكائنات الحية هو نظام التحكم التي تستخدمه الطيور الجارحة وهي تهوي من ارتفاعات شاهقة وبسرعات عالية على فرائسها على سطح الأرض أو تحت سطح الماء فتمسك بها وتعود طائرة بها إلى الجو دون أن ترتطم بالأرض أو تفقد توازنها رغم الثقل المضاف عليها من فريستها. وكذلك في بعض الكائنات الحية كالحرباء التي تغير لون جلدها تبعا للون الخلفية التي توجد فيها وذلك لكي تختفي عن أنظار أعدائها.

أما أنظمة التحكم الصناعية الحديثة فلم تظهر إلا قبل مائة عام تقريبا باستثناء استخدامات بسيطة كاستخدام اليونانيون ومن تبعهم آليات التغذية الراجعة للتحكم بمستوى السوائل في الساعات المائية وبعض أنظمة توزيع المياه. وفي القرن السادس عشر ظهرت بعض أنظمة التحكم الميكانيكية التي تستخدم التغذية

الراجعة كالتحكم في كمية الحبوب التي تدخل في المطحنة كلما زادت سرعة دورانها وكذلك التحكم في درجة حرارة الأفران. ومع اختراع الآلة البخارية في منتصف القرن الثامن عشر لزم الأمر اختراع عدد من أنظمة التحكم التي تساعدها في أداء وظيفتها على الوجه المطلوب كالصمامات المحكومة بالعوامات الموجودة في الخزانات التي تزود الآلة البخارية بالماء وكمنظمات الضغط في الغلايات. وفي عام 1788م تمكن جيمس وات مخترع الآلة البخارية من اختراع جهاز لتنظيم سرعة آلته باستخدام جهاز يعتمد على الطرد المركزي (centrifugal flyball governor) وهذا أول نظام تحكم ميكانيكي يظهر مبدأ التغذية الراجعة وأهميتها في أنظمة التحكم. وفي منتصف القرن التاسع عشر تمكن الفلكي الانكليزي أيري (G.B. Airy) من اختراع نظام تحكم بتغذية راجعة لتصويب التلسكوبات باتجاه النجوم بشكل ذاتي وهو أول من لاحظ ظاهرة عدم الاستقرار في أنظمة التحكم مغلقة الحلقة (closed-loop control systems).

وفي عام 1868م استخدم العالم الفيزيائي جيمس ماكسويل المعادلات التفاضلية لدراسة منظم الطرد المركزي لمعرفة مدى استقراره وتبين له أن النظام يكون مستقرا إذا كانت معادلته المميزة لها جذور بجزء حقيقي سالب (negative real part). ومن العلماء البارزين في تلك الفترة الذين درسوا نظرية الاستقرار في أنظمة التحكم الخطية وغير الخطية الإنكليزي روث (E.J. Routh) والانكليزي هيفيسايد (O. Heaviside) والروسي ليبونوف (A.M. Lyapunov). وفي عام 1927م بين بلاك (H.S. Black) أهمية استخدام التغذية الراجعة السلبية في استقرار المضخات الإلكترونية وقد قام الأمريكي نايكويست (H. Nyquist) في عام 1932م باشتقاق شرط الاستقرار المسمى باسمه (Nyquist stability criterion) للمضخمات الإلكترونية. وفي عام 1938م قام بود (H.W. Bode) بإدخال مفاهيم الاستجابة الكمية والطورية (magnitude & phase response) لدراسة أنظمة التحكم. وخلال الحرب العالمية الثانية تركز البحث في تصميم أنظمة تحكم لتصويب مختلف أنواع الأسلحة نحو الأهداف الثابتة والمتحركة وخاصة تلك المحمولة بالسفن والطائرات وكذلك لتوجيه أنظمة الرادار. وفي عام 1941م أشار الأمريكي هوول (A.C. Hall) إلى التأثير السلبي للضجيج (noise) على أنظمة التحكم ونصح باستخدام الميدان الترددي (frequency domain) بدلا من الميدان الزمني (time domain) وكذلك استخدام المرشحات (filters) لتقليل الضجيج. ومع اختراع الترانزستور في عام 1947م وبقية النبائط الإلكترونية من مصوغات ومحفزات أصبح بالإمكان بناء أنظمة تحكم كهربائية معقدة لا يمكن بناؤها بالطرق الميكانيكية وأصبحت أنظمة التحكم تدخل في كثير من التطبيقات لصغر حجمها وخفة وزنها. ومع ظهور أنظمة الصواريخ الموجهة والأقمار الصناعية والمركبات الفضائية ازداد الطلب على أنظمة التحكم التي بدأت تتعامل بمداخل ومخارج متعددة مما زاد التعقيد في تصميمها وتحليلها مما اضطر العلماء للعودة إلى الميدان الزمني لدراستها. ومع اختراع الحاسوب والمتحكمات المنطقية المبرمجة والمتحكمات الدقيقة بدأ باستخدام أنظمة التحكم الرقمية بالغة الذكاء والتي سهلت كثيرا في بناء المصانع ذات خطوط الإنتاج والتجميع وأدت إلى ظهور مختلف أنواع الأجهزة والمعدات الذكية.

3-8 أنواع أنظمة التحكم

تم تقسيم أنظمة التحكم إلى نوعين رئيسين وهما التحكم مفتوح الحلقة (open-loop control) والتحكم مغلق الحلقة (closed-loop control) ففي النوع الأول تستخدم إشارة التحكم مباشرة لتغيير حالة

النظام المحكوم إلى الوضع المطلوب بينما تستخدم في النوع الثاني إشارة الخطأ (error signal) في التحكم في حالة النظام حيث يتم الحصول على إشارة الخطأ من حاصل طرح إشارة أو أكثر تتناسب قيمها مع متغيرات حالة النظام من إشارة التحكم الخارجية ويطلق على النوع الثاني اسم نظام التحكم ذي التغذية الخلفية السالبة (negative feedback control system). فعلى سبيل المثال فإن التحكم بنظام القيادة في السيارات القديمة هو من النوع المفتوح حيث يقوم السائق من خلال المقود وبعض المعدات الميكانيكية بالتحكم باتجاه العجلات بينما تم في الأنواع الحديثة استخدام التغذية الخلفية السلبية مع وجود المضخمات الهيدروليكية في أنظمة القيادة للحصول على قيادة أكثر سهولة ودقة. ويمكن تصميم بعض الأنظمة بحيث لا تحتاج إلى نظام للتحكم بها إلى الأبد وذلك من الناحية النظرية أو لفترات زمنية طويلة من الناحية العملية فعلى سبيل المثال فإنه بمجرد وضع الأرض في مدار محدد حول الشمس بحيث تدور حول الشمس مرة كل عام وتدور حول محورها مرة كل يوم وتتأرجح حول محورها مرة كل عام فإنها ستبقى على هذا الحال إلى الأبد نظريا وبلايين السنيين عمليا. وفي المقابل فإن وضع قمر صناعي في مدار محدد حول الأرض قد لا يحتاج من ناحية نظرية إلى نظام تحكم لإبقائه في مداره قياسا على حالة الأرض ولكن في الواقع تحتاج الأقمار الصناعية لنظام تحكم معقد لإبقائها في مداراتها حيث أنها بسبب خفة وزنها فإن الجسيمات القادمة من الفضاء تصطدم بها فتزيحها بشكل بطيء عن مدارها ولذلك يتم وضع أجهزة على القمر الصناعي تقيس بعده عن الأرض فتعطى الأوامر لمحركات على ظهره لتصويب مداره.

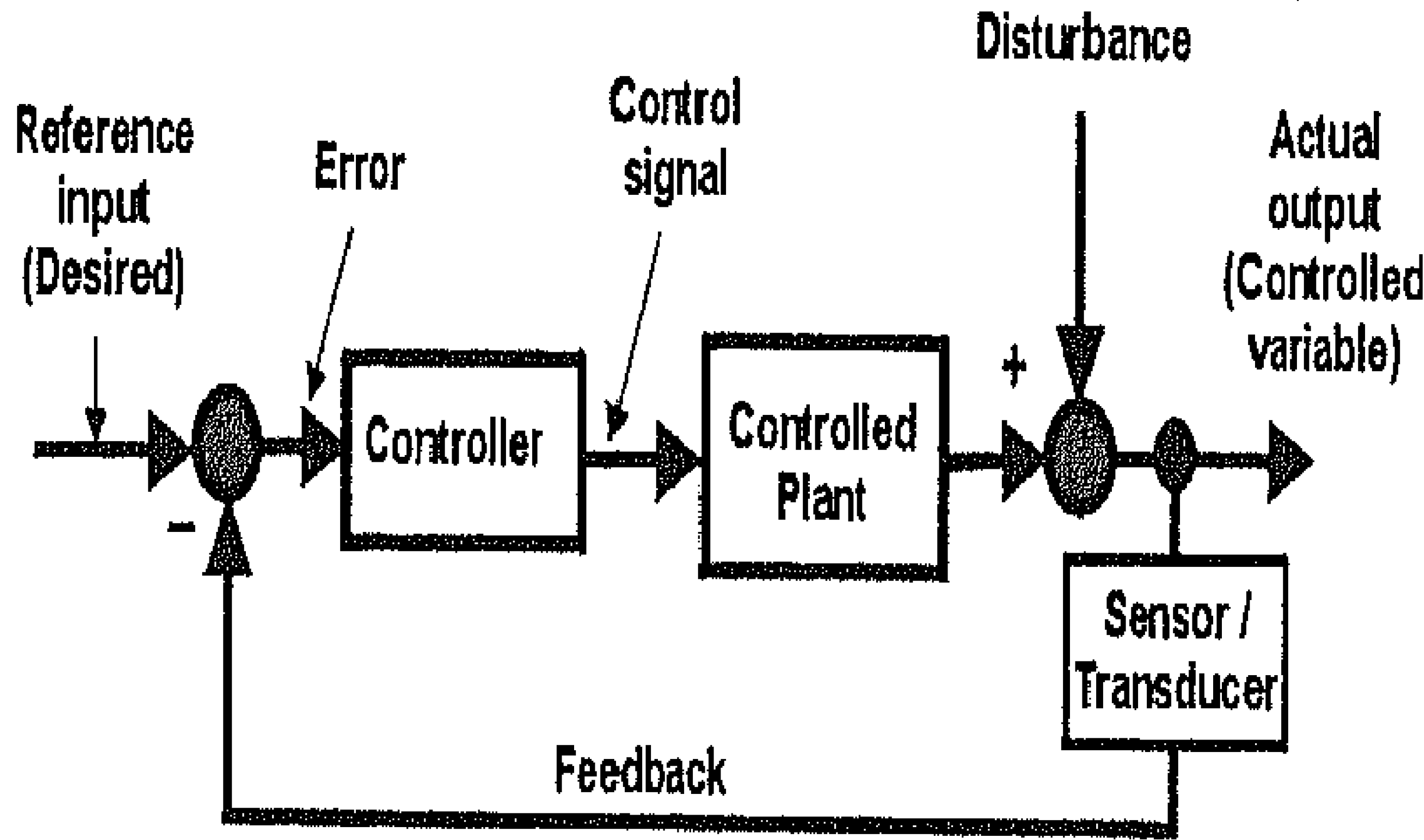
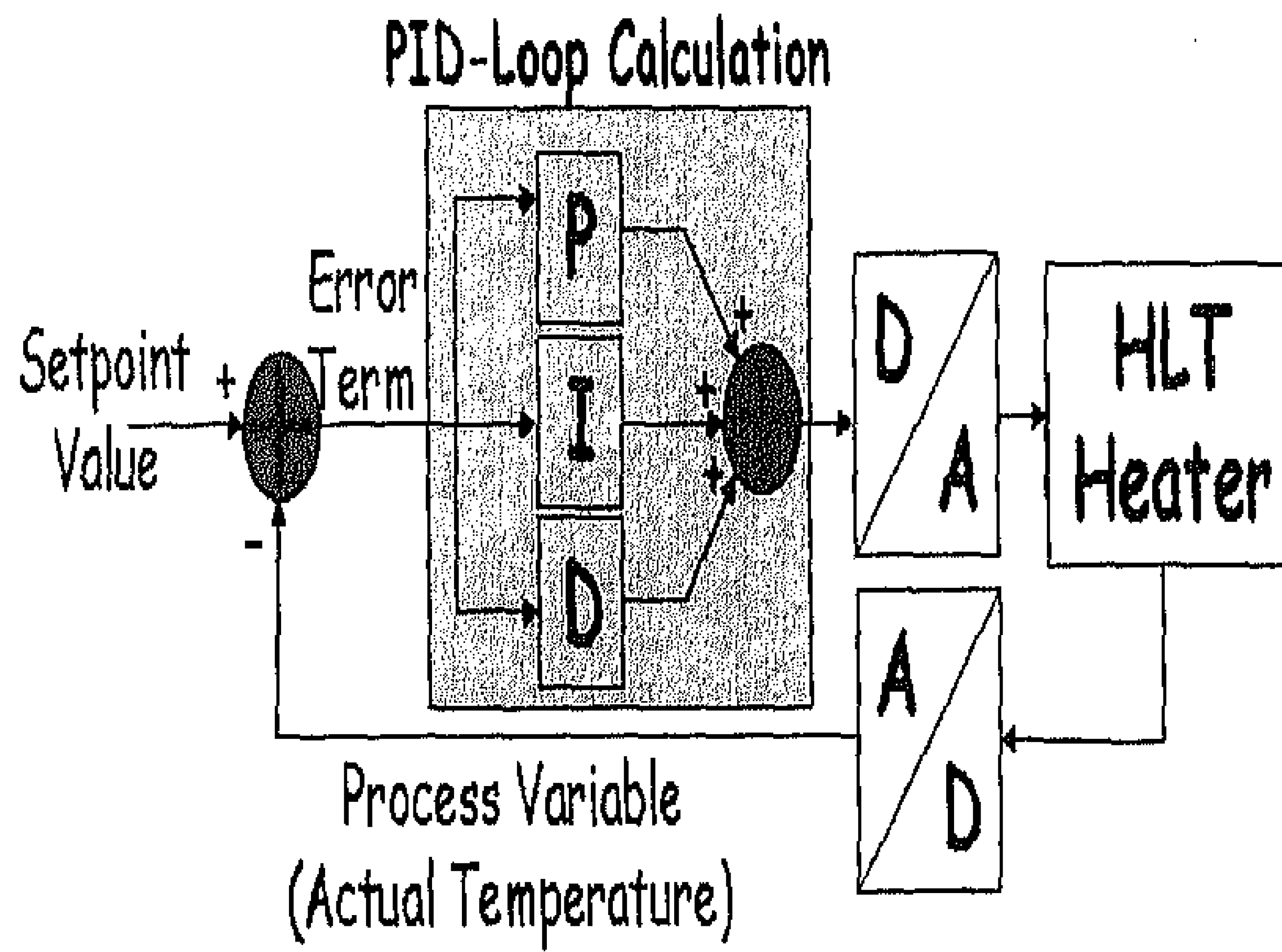


Fig.15: Feedback control system

ويمكن تقسيم أنظمة التحكم من حيث طريقة عملها إلى قسمين رئيسين وهما التحكم المنطقي أو التتابعي أو المبرمج (logic or sequential or programmable control) والتحكم الخطي أو المغذى خلفيا (linear or feedback control). ويمكن بناء أنظمة تجمع بين نوعي التحكم الرئيسين كما هو الحال مع أنظمة التحكم المنطقي المشوش (fuzzy logic control). يقوم النوع الأول وهو نظام التحكم المنطقي في عمله من خلال تخزين الخطوات المراد إجراؤها لكي يقوم النظام الكلي بوظيفته في ذاكرة ما وذلك على شكل برنامج وعند إعطاء إشارة البدء للنظام فإن نظام التحكم يبدأ بتنفيذ البرنامج خطوة – خطوة إلى أن ينهي جميع خطوات البرنامج. إن أعقد أنواع التحكم المنطقي هي تلك المستخدمة في تصنيع أجسام الكائنات الحية حيث يوجد في الخلية الأولى التي يبدأ منها تصنيع الكائن الحي برنامج رقمي يحتوي على كامل برنامج التصنيع وعند إعطاء إشارة البدء للخلية فإنها تبدأ بالانقسام المتكرر تحت سيطرة البرنامج إلا أن يتم الانتهاء من تصنيع جسم الكائن. فعلى سبيل المثال فإن البرنامج الرقمي المستخدم في تصنيع جسم الإنسان مكون من ألف مليون شيفرة مخزنة على شريط من الحامض النووي (DNA) بطول مترين وعرض اثنين نانومتر فقط أما بقية أنواع الكائنات الحية والتي تعد بالملايين فإن لها برامج تصنيع رقمية كما في الإنسان ولكن بطول أقل وقد تتم عملية التصنيع في دقائق معدودة كما في البكتيريا وقد تمتد لما يزيد عن عام في الثدييات. وقبل اختراع أنظمة التحكم الحديثة كان عقل الإنسان هو الوسيلة الوحيدة لحفظ برامج التحكم فعندما يقوم الشخص

بعمل ما فإن الخطوات اللازمة للقيام بذلك العمل تكون مخزنة على شكل برنامج في عقله وبمجرد أن يبدأ بالعمل فإنه سيقوم بتحريك رجليه ويديه ورأسه على هدي ذلك البرنامج. فالمزارع والحداد والنجار والخباز والخياط وغير ذلك من المهنيين عندما يقومون بأعمالهم وإنتاج ما ينتجون فإن برامج التحكم تخزن في عقولهم بعد أن يتم تدريبهم على الطريقة التي سيتبعونها في إنجاز أعمالهم على أكمل وجه.

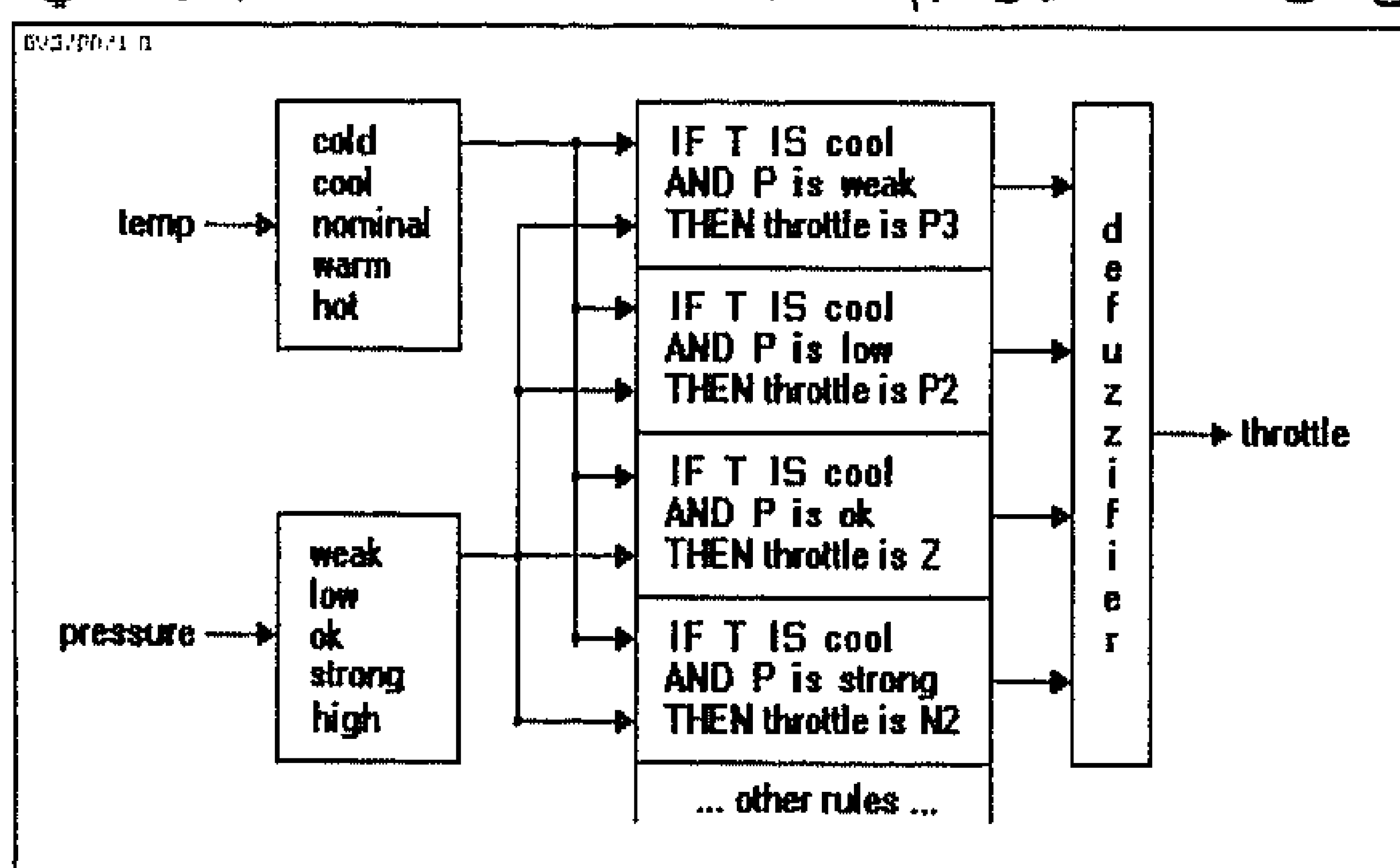
أما النوع الثاني من أنواع التحكم فهو نظام التحكم الخطي أو المغذى خلفيا (linear or feedback control) وفيه يتم استخدام التغذية الراجعة السالبة (negative feedback) لإنتاج إشارة تحكم تعمل على إبقاء المخرج الذي ينتجه النظام المتحكم به ضمن الحدود المسموح بها. فعلى سبيل المثال فالسائق الذي يقود سيارته بسرعة معينة على الشارع العام يستخدم نظام التحكم ذي التغذية الراجعة لإبقاء سيارته ضمن جزء الشارع المخصص له حيث تقوم عيناه بتزويد عقله بصور متكررة عن الشارع فيقوم العقل بتحديد حدود الشارع المسموح للسيارة أن تبقى ضمنها ثم يرسل إشارات تحكم إلى عضلات يد السائق لتحرك المقود بالاتجاه الذي يبقي السيارة ضمن الحدود المسموح بها من الشارع. وللتدليل على القدرة الفائقة للعقل البشري للقيام بهذه المهمة هو أن المهندسين رغم التقدم المذهل في تقنيات التحكم لم يتمكنوا إلى الآن من استبدال السائق البشري بسائق آلي حيث يتطلب الأمر وضع كميرات ومستشعرات كثيرة على السيارة تغذي الإشارات التي تجمعها عن الشارع إلى حاسوب جبار يحتوى على برامج معقدة لتعالج هذه الإشارات لتستخلص منها حدود الشارع في كل لحظة زمنية ومن ثم يرسل إشارات تحكم لمقود السيارة ودواسات الوقود والفرملة.



وفي أنظمة التحكم الحديثة يتم استخدام مصوغات (transducer) لإنتاج إشارة كهربائية تتناسب قيمتها مع قيمة خرج النظام المتحكم به مهما كان شكله ومن ثم يتم مقارنة هذه الإشارة بعد معالجتها بدوائر إلكترونية بإشارة كهربائية مرجعية (reference signal) لإنتاج ما يسمى بإشارة الخطأ (error signal) والتي تستخدم بعد معالجتها كإشارة تحكم تعمل على تغيير مخرج النظام بالاتجاه الذي يجعله أقرب ما يكون من قيمة الخرج المطلوب. وغالبا ما يتم تكبير إشارة الخطأ الضعيفة بمضخمات ميكانيكية أو كهربائية وذلك لكي تكون قادرة على التحكم بالنظام. ويسمى نظام التحكم الخطي الذي تتناسب فيه إشارة الخطأ مع الفرق بين الإشارة المقاسة (measured signal) والإشارة المرجعية بالتحكم التناسبي (proportional control). وعادة ما يتم تكبير إشارة الخطأ باستخدام المضخمات الإلكترونية وذلك للتسريع في عملية تصحيح قيمة الخرج ولكن مثل هذا التسريع قد يؤدي إلى نظام غير مستقر (unstable system) تبدأ فيه قيمة الخرج بالتذبذب أو التأرجح حول القيمة المرجعية وقد يخرج النظام في نهاية المطاف عن نطاق السيطرة. ويطلق على مثل هذا النظام المتذبذب اسم نظام التحكم ذي الاستجابة المتدنية الإخماد (under-damped response control system). ولتجنيب نظام التحكم من الدخول في مثل هذه الحالة غير المستقرة يتم تخفيض كسب المضخم دون قيمة حدية يمكن حسابها من مواصفات مكونات نظام التحكم وإذا ما تم تصميم النظام للعمل

عند هذه القيمة الحدية فإنه يسمى نظام التحكم ذي الاستجابة الحدية الإخماد (critically-damped response control system). أما إذا كانت قيمة الكسب أقل من القيمة الحدية فإن النظام يسمى نظام التحكم ذي الاستجابة المرتفعة الإخماد (over-damped response control system) وهو نظام مستقر إلا أنه بطئ حيث تستغرق عملية تصحيح قيمة خرج النظام وقتا طويلا يزداد كلما قلت قيمة الكسب.

وللحصول على أنظمة تحكم مستقرة وسريعة الاستجابة فقد قام العلماء بإجراء تعديلات على نظام التحكم التناسبي ومن أهم هذه الأنظمة المعدلة النظام المسمى بنظام التحكم التناسبي-التكاملي-التفاضلي (proportional-integral-derivative (PID) control). وفي هذا النظام يتم تمرير إشارة الخطأ في ثلاثة مسارات متوازية المسار الأول يحتوي على مضخم فقط والثاني يحتوي على مكامل (integrator) متبوع بمضخم والثالث يحتوي على مفاضل (differentiator) متبوع بمضخم ومن ثم يتم جمع الإشارات الخارجة من هذه المسارات الثلاثة واستخدام الإشارة الناتجة كإشارة للتحكم بالنظام بحيث تدفع بخرجه باتجاه القيمة المرجعية. يتميز هذا النظام المعدل على نظام التحكم التناسبي بأن إشارة التحكم لا تتحدد فقط من القيمة الآنية لإشارة الخطأ بل من معدل القيم السابقة لها والتي يولدها المكامل وكذلك من معدل تغير إشارة الخطأ مع الزمن والتي يولدها المفاضل ولهذا فإن هذا النظام المعدل أكثر استقرارا وأسرع استجابة من سابقه. وعادة ما يتم اختيار نقطة التشغيل المثلى من خلال اختيار قيم الكسب للمضخمات الثلاث الموجودة في المسارات الثلاث إما من خلال التحليل الرياضي أو من خلال أسلوب المحاولة والخطأ (trial and error procedure). وعند استخدام التحليل الرياضي لدراسة أنظمة التحكم يوجد عدة طرق أهمها ما يسمى بالدالة الانتقالية (transfer function) وهي تمثل العلاقة بين خرج ودخل النظام في الميدان الترددي (frequency domain) وعادة ما يتم استخدام تحويل لابلاس (Laplace transform) لتحويل العلاقة من الميدان الزمني إلى الميدان الترددي. إن الدالة الانتقالية مناسبة لأنظمة التحكم ذات المدخل الواحد والمخرج الواحد وفي حالة وجود أكثر من مدخل ومخرج يتم استخدام فضاء الحالة (state space) لتمثيل نظام التحكم. ويمثل نظام التحكم عند استخدام فضاء الحالة بمجموعة متغيرات تمثل حالة دخل وخرج النظام وغالبا ما تحكم هذه المتغيرات بمعادلات تفاضلية يؤدي حلها عند أي لحظة زمنية إلى إيجاد حالة النظام في تلك اللحظة بشرط أن تعطى القيم الابتدائية لحالة النظام.



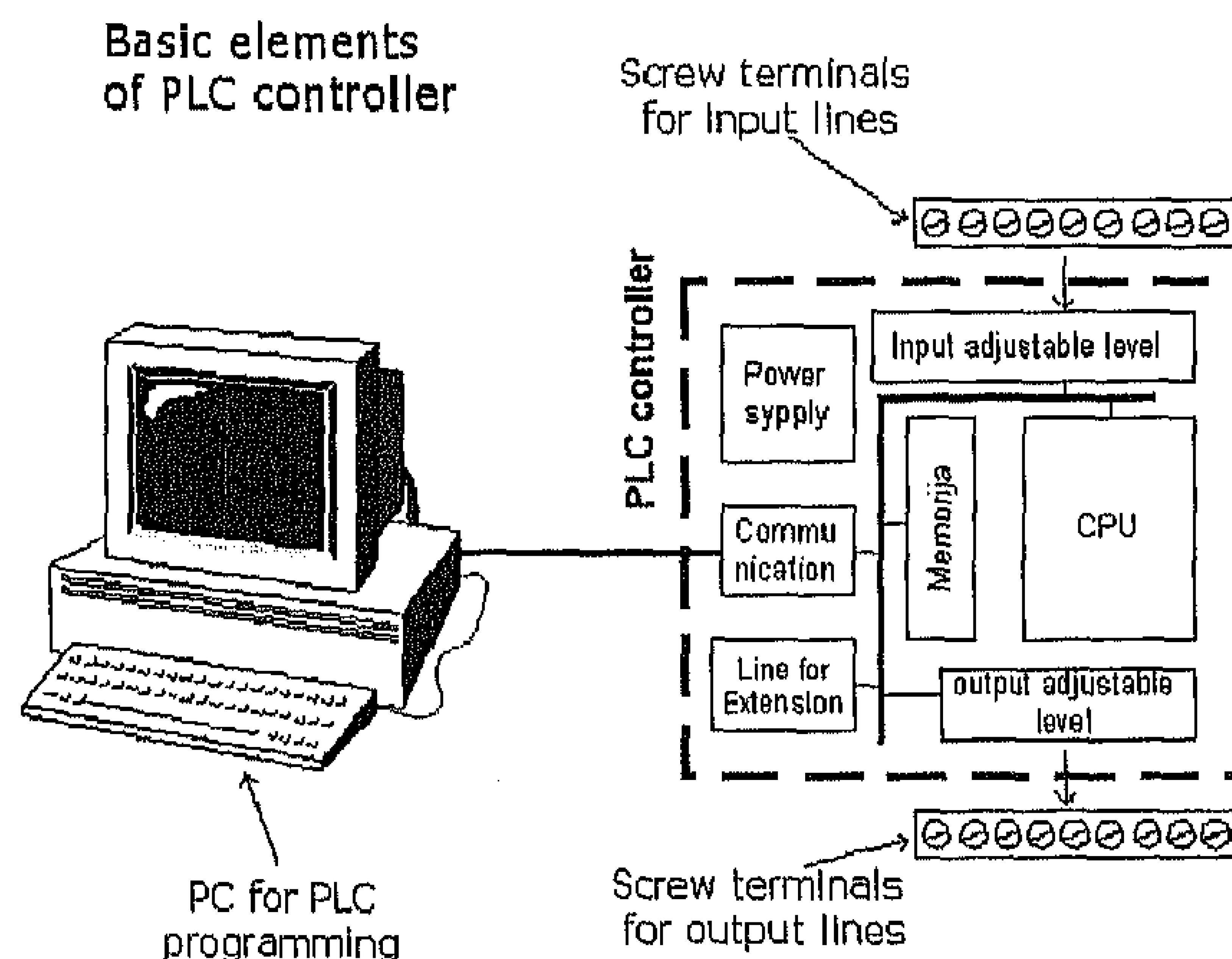
ويمكن الجمع بين نوعي التحكم الرئيسين في كثير من التطبيقات بحيث يتم استخدام إشارة الخطأ لتعديل برنامج التحكم بطريقة ما لتتماشى مع الوضع المتغير للنظام. وفي مثل هذا النظام المهجن (hybrid system) وجد العلماء أن استخدام المنطق المشوش (fuzzy logic) يسهل من تصميم مثل هذه الأنظمة ولذلك سمي بنظام التحكم المنطقي المشوش (fuzzy logic control system). إن أول من وضع أساسيات المنطق المشوش هو الرياضي وعالم الحاسوب الإيراني الأصل والأمريكي المنشأ لطفي زادة (Lotfi Zadeh) وذلك في عام 1965م. وفي المنطق المشوش يتم التعامل مع الكميات المختلفة بطريقة تقريبية وفي الغالب يتم تقسيم كامل المدى الذي تتخذه الكمية المعنية إلى عدد محدود من المستويات أقلها مستويين فعلى

سبيل المثال فإن درجة حرارة الماء أو الهواء يتم تمثيلها بأربعة مستويات وهي حار جدا وحار وبارد وبارد جدا وذلك بالنسبة لدرجة حرارة مرجعية يتم تحديدها في النظام المستخدم. وعادة ما يتم تمثيل هذه المستويات بأرقام تقع بين الصفر والواحد كأن يعطى الرقم واحد للحار جدا والرقم الصفر للبارد جدا. ويمكن استخدام قواعد المنطق الرقمي في عمليات المنطق المشوش ولكن بطريقة أكثر صعوبة وذلك بسبب تعاملها مع أكثر من مستوين.

وقد تم استخدام المنطق المشوش في تطبيقات كثيرة من أهمها أنظمة التحكم والذكاء المصطنع والشبكات العصبية وغيرها. ففي نظام التحكم المشوش يتم تحويل الكمية الفيزيائية المراد التحكم بها إلى إشارة كهربائية باستخدام المصوغ المناسب ومن ثم يتم تمثيل قيمة الإشارة بأحد المستويات التي اختارها مصمم النظام وبناءا على قيمة المستوى يتم اختيار أمر التحكم المناسب الذي يشغل عنصر النظام الذي يتحكم بالكمية الفيزيائية. وفي كثير من أنظمة التحكم يكون عدد المداخل أكثر من واحد وكذلك عدد المخارج وفي هذه الحالة يتم استخدام المصفوفات لتمثيل القواعد المنطقية التي تحكم عمل نظام التحكم. ومن أشهر القواعد المنطقية المستخدمة في التحكم المشوش هي قاعدة: إذا كان المتغير س في وضع كذا والمتغير ص في وضع كذا فعليه يكون الخرج كذا (IF-THEN statements). إن عمل نظام التحكم المشوش أشبه ما يكون بطرق التحكم التي يستخدمها الإنسان في حياته اليومية فعلى سبيل المثال فعند ضبط درجة حرارة ماء الاستحمام يستخدم الشخص يده لمعرفة درجة حرارة الماء بشكل تقريبي هل هو حار أم بارد أم مقبول بالنسبة لجلد كامل جسمه ومن ثم يستخدم يديه لضبط كمية الماء النازل من كل من مصدر الماء الساخن والبارد حتى يحصل على ماء الاستحمام بدرجة الحرارة المناسبة. لقد كان اليابانيون أول من استخدم نظام التحكم المشوش في بعض التطبيقات وكان ذلك في منتصف السبعينات ومن ثم انتشرت حمى استخدامه في الثمانينات في تطبيقات لا حصر لها بعد أن ثبت تميزه على كثير من أنظمة التحكم التقليدية من حيث سرعة استجابته واستقراره. ولقد تم استخدام التحكم المشوش بكفاءة عالية في الغسالات الذكية التي تحدد طول دورة الغسل وكمية الماء والمسحوق من وزن الثياب ونوعها ودرجة اتساخها وفي الكميرات ذاتية التركيز وفي المكيفات الموفرة للطاقة.

4-8 مكونات نظام التحكم

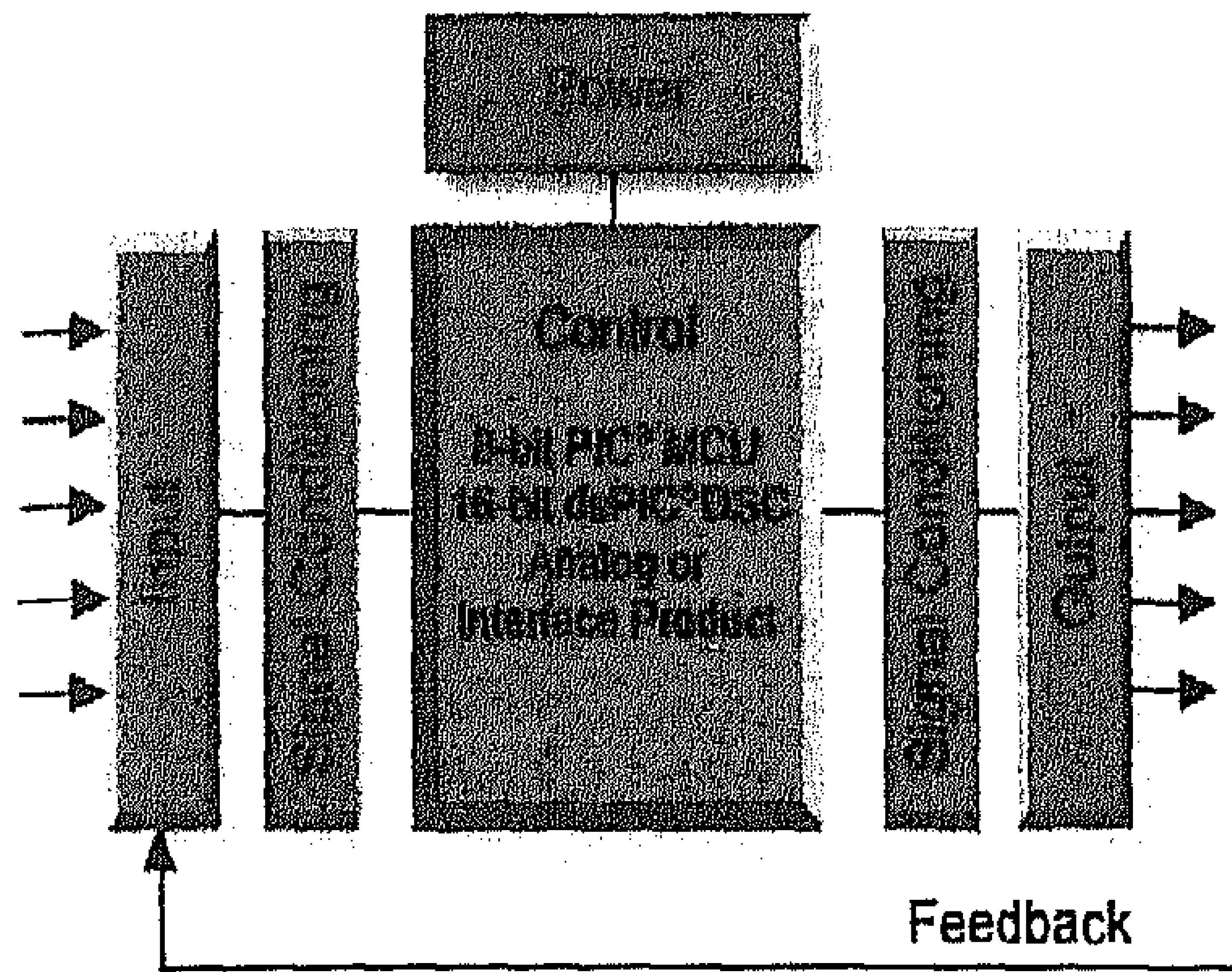
تنقسم أنظمة التحكم الصناعي من حيث طريقة بنائها إلى نوعين رئيسيين وهما التحكم الميكانيكي والتحكم الكهربائي. ففي التحكم الميكانيكي تستخدم الأدوات الميكانيكية من تروس وكامات وأذرع وصمامات وغيرها لبناء كامل نظام التحكم ولا وجود لأي مكون كهربائي فيه. أما نظام التحكم الكهربائي فيتكون من مكونات كهربائية وتستخدم الإشارات الكهربائية لنقل إشارات التحكم. ويتميز نظام التحكم الكهربائي على الميكانيكي



بإمكانية تصميم أنظمة تحكم بالغة التعقيد قادرة على التحكم بأنظمة كبيرة جدا كمحطات التوليد وخطوط الإنتاج أو صغيرة جدا كالساعات هذا بالإضافة إلى سرعة استجابتها وإمكانية التحكم عن بعد. وتكاد تكون جميع أنظمة التحكم الحديثة من النوع الكهربائي وذلك لسهولة تصميمها وسهولة برمجتها وصغر حجم معداتها بحيث أصبح بالإمكان استخدامها في مختلف الأجهزة والمعدات الميكانيكية والكهربائية وحتى بعض الأنظمة الحيوية. وللتحكم بأنظمة غير كهربائية باستخدام نظام تحكم كهربائي يلزم وجود نوعين من الأجهزة المهمة وهي الحساسات أو المجسات (sensors) والمحفزات أو المشغلات (actuators). فالحساسات تقوم بتحويل مختلف الكميات الفيزيائية التي تتعامل معها الأنظمة المراد التحكم بها إلى إشارات كهربائية تغذى إلى نظام التحكم الكهربائي. ولكل كمية فيزيائية يوجد حساس خاص بها يتم تصميمه استنادا على الظواهر الكهربائية المختلفة التي شرحناها في الباب الأول وفي الغالب لا يمكن لحساس واحد أن يعمل عند جميع القيم التي تتخذها الكمية الفيزيائية بل يتم تصميم حساسات لنطاقات محددة من المدى الكلي للقيم. فحساسات درجة الحرارة المستخدمة في المكيفات غير تلك المستخدمة في الأفران أو في الثلاجات وهكذا الحال مع بقية الحساسات. ويعتمد مبدأ عمل الحساس على نوع الكمية الفيزيائية فحساسات درجة الحرارة على سبيل المثال تعتمد على عدة ظواهر كالمزدوج الحراري (thermocouple) والمقاومة المتغيرة مع الحرارة (thermistor) وحساس الضغط على التأثير الكهروضغطي (piezoelectric) وحساس المجال المغناطيسي على تأثير هول (Hall effect) وهكذا الحال مع بقية الحساسات المستخدمة لقياس السرعة والمسافة والرطوبة وشدة الضوء وشدة الصوت وغيرها. ويتوفر الآن في الأسواق حساسات بمختلف الأنواع والأشكال بعضها ينتج بكميات كبيرة جدا تناسب التطبيقات العامة وبعضها يتم تصميمها خصيصا لتناسب بعض التطبيقات الخاصة. أما المحفزات أو المشغلات فهي عبارة عن أجهزة تستجيب بطريقة ما لإشارات التحكم الكهربائية المسلطة عليها بحيث تقوم بالتحكم بأحد متغيرات النظام المتحكم به ودفعه للعمل عند القيم المطلوبة. وتأتي المحفزات كما في الحساسات بأشكال مختلفة ولكن بعدد أقل من الأنواع ومن أشهر المحفزات ما يسمى بالمرحلات (relays) والتي تقوم بفتح وإغلاق دوائر كهربائية تسمح بمرور تيارات كهربائية عالية فيها قادرة على تشغيل المغناطيسات والمحركات الكهربائية التي تعمل على تشغيل أجهزة ومعدات ميكانيكية.

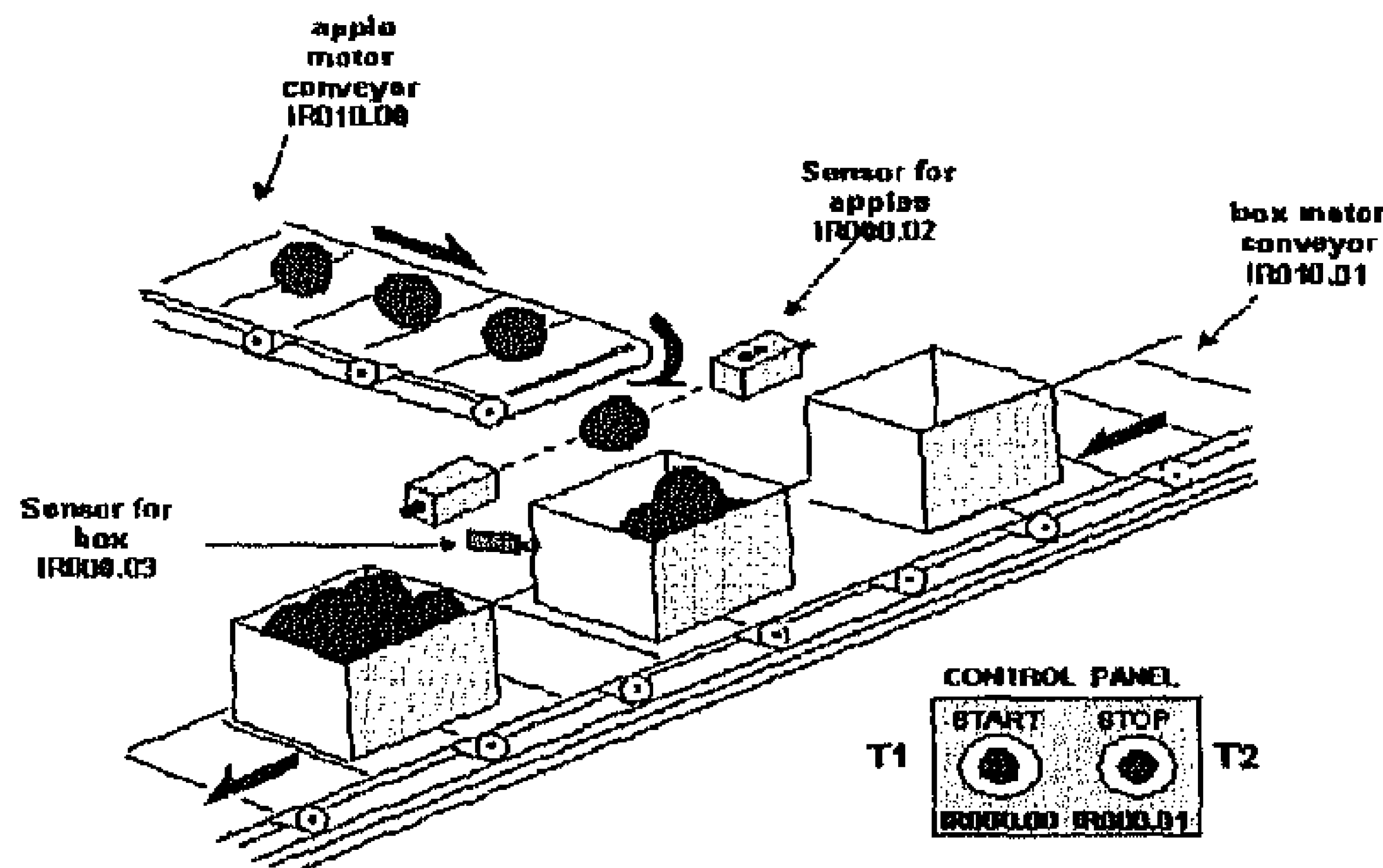
أما نظام التحكم الكهربائي فقد كان في السابق يتم بناؤه من قطع كهربائية وإلكترونية مفردة (discrete) ولكن مع ظهور الحواسيب والمعالجات الدقيقة والمتحكمات الدقيقة بدأ التحول بالكامل إلى استخدام هذه الأنظمة في جميع أنظمة التحكم. لقد دفع التعقيد البالغ في أنظمة التحكم المستخدمة في خطوط الإنتاج والتجميع وخاصة خطوط تجميع السيارات المهندسين للبحث عن بديل عن آلاف المرحلات المستخدمة في أنظمة التحكم والتي كانت تملأ مساحات واسعة من جدران المصانع. ولقد كان البحث عن عطل ما في هذه اللوحات الواسعة يستغرق وقتا طويلا يمتد لعدة ساعات تتوقف خلالها عملية الإنتاج هذا بالإضافة إلى أن إجراء أي تعديل على تركيب خط الإنتاج يتطلب جهدا بالغا في إعادة عملية توصيل المرحلات. وفي بداية السبعينات تم استخدام حواسيب خاصة تحل محل هذه اللوحات المعقدة سميت بالمتحكمات المنطقية المبرمجة (programmable logic controllers (PLC)) وهي عبارة عن وحدة معالجة مركزية مزودة بذاكرة قابلة للبرمجة ومرتبطة بعدد كبير من المداخل والمخارج يتم ربط مختلف الحساسات والمفاتيح بالمداخل وربط مختلف المحفزات بالمخارج ويتم تحميل البرنامج الذي يكتب عادة بلغة خاصة بهذه المتحكمات في الذاكرة. ويقوم هذا البرنامج عند تشغيله بمسح لجميع المداخل لمعرفة حالتها ثم بناءا على هذه المعطيات يقوم بتحديد الحالة التي ستكون عليها المخارج ويعطى الأوامر بإبقائها على حالها أو يقوم بتغيرها. لقد تقلصت أحجام

أنظمة التحكم المستخدمة في خطوط الإنتاج بشكل كبير جدا وأصبح من السهل اكتشاف الأعطال في دقائق معدودة والأهم من ذلك أن عملية تعديل خطوط الإنتاج أصبحت سهلة وسريعة مما ساعد على تطوير مواصفات المنتجات في فترات زمنية متقاربة. وفي بداية الثمانينات ظهرت المتحكمات الدقيقة (microcontroller) وتم استخدامها بنجاح في أنظمة التحكم المختلفة بل أدى ظهورها إلى ظهور أجهزة ومعدات ذكية في مختلف المجالات وذلك بسبب صغر حجمها وقلة استهلاكها للطاقة فلا يكاد يخلو اليوم أي جهاز مهما صغر حجمه ومهما كانت بساطة وظيفته من متحكم دقيق. لقد تزايد الطلب على المتحكمات الدقيقة منذ ظهورها وذلك لتحويل مختلف أنواع الأجهزة والمعدات إلى أنظمة ذكية قابلة للبرمجة وقد بلغ عدد المتحكمات الدقيقة المباعة في عام 2006م فقط أربعة بلايين متحكم وهو يزيد قليلا عن عدد المعالجات الدقيقة المباعة في ذلك العام. وعلى العكس من المعالجات الدقيقة التي لم يتوقف تطويرها منذ ظهورها لزيادة قدرتها الحسابية فإن المتحكمات لا تحتاج لقدرات حسابية كبيرة في معظم التطبيقات ولذالك فهي لا تحتاج لكثير من التطوير وغالبا ما يكفي متحكم بعرض ناقل أربع أو ثمان بتات لكثير من أنظمة التحكم بينما تحتاج بعض أنظمة التحكم المعقدة إلى متحكمات بناقل عرضه 16 أو 32 بت. ويتطلب تصنيع المتحكمات الدقيقة عناية خاصة حيث أنها تعمل في الغالب في ظروف قاسية من حيث درجات الحرارة والاهتزازات الميكانيكية والرطوبة والإشعاعات فالمتحكمات الموجودة بالقرب من محركات المركبات تتعرض لدرجات حرارة عالية ومتباينة وكذلك تشويش عالي من شمعات الإشعال وكذلك هو الحال مع المتحكمات الموجودة في الأقمار الصناعية والمركبات الفضائية والصواريخ الحربية وغيرها.



5-8 استخدامات أنظمة التحكم الصناعية

إن أكثر استخدام لأنظمة التحكم هو كما ذكرنا سابقا في الكائنات الحية فلا يكاد يخلو كائن حي من عدد من أنظمة التحكم التي تساعد جسمه على القيام بوظائفه المختلفة على الوجه الأكمل. ولو أردنا أن نحصى أنواع أنظمة التحكم الطبيعية المستخدمة في الكائنات الحية لما أحصيناها عددا ولقد ضربنا بعض الأمثلة على هذه الأنظمة في الشرح السابق. ويعكف كثير من علماء التحكم على دراسة هذه الأنظمة الطبيعية للاستفادة منها في بناء أنظمة تحكم صناعية تستخدم نفس الآليات لمختلف التطبيقات المدنية والعسكرية. فلقد استفاد العلماء كثيرا من أشكال أجسام الطيور والآليات المختلفة التي تستخدمها في الطيران لبناء طائرات حديثة كبيرة الحجم ذات كفاءة عالية.



واستفادوا كذلك كثيرا من تركيب أعين الكائنات الحية لبناء أنظمة رؤيا للإنسان الآلي وفي أنظمة الرادار والكاميرات وأنظمة الرؤيا الليلية. أما استخدامات أنظمة التحكم الصناعية فإنه يصعب حصر عددها حتى على المختصين في هذا المجال فلا يكاد يخلو اليوم جهاز من نظام للتحكم مهما بسطت وظيفته. وكما هو معروف فإن التحكم الآلي موضوع هندسي يتم تدريسه في تخصصات هندسية متعددة كالهندسة الكهربائية والميكانيكية والكيمائية والصناعية والطبية وذلك لأن جميع هذه التخصصات تستخدم أنظمة التحكم في أجهزتها ومعداتها ومنشأتها. وسنشرح في ما يلي بعض الاستخدامات الرئيسية لأنظمة التحكم في بعض المجالات لعل ذلك يكون دافعا للاهتمام بهذا الموضوع البالغ الأهمية الذي لعب دورا كبيرا في زيادة رفاهية البشر وقلل بشكل كبير جدا كلفة إنتاج مختلف أنواع السلع الأساسية والكمالية.

الأتمتة الصناعية (Industrial Automation)

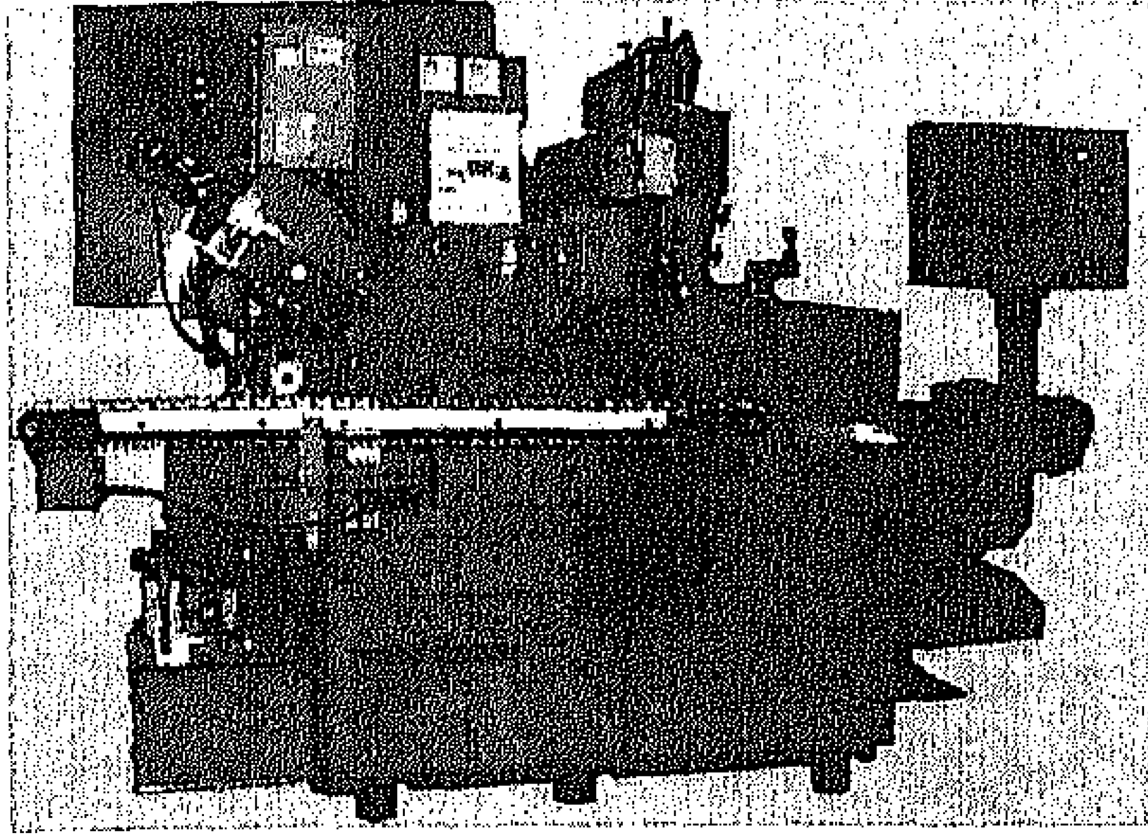


تعرف الأتمتة الصناعية على أنها استخدام أنظمة التحكم الآلي للتحكم بالعمليات الصناعية (industrial processes) والآلات الصناعية (industrial machines) بأقل قدر ممكن من التدخل البشري أو بشكل أوضح وهو إحلال أنظمة التحكم محل العامل البشري لإدارة وتشغيل مختلف أنواع الآلات والعمليات الصناعية. وتختلف الأتمتة الصناعية عن المكنكة الصناعية (industrial mechanization) من حيث أن المكنكة هي إستعانة الإنسان بالآلات الميكانيكية لإنجاز مختلف الأعمال. لقد ساعدت المكنكة الإنسان على إنجاز أعمال لا يمكنه القيام به أو قللت من الجهد الذي كان يبذله بدونها وزادت كذلك من كمية الإنتاج إلى حد ما. أما الأتمتة فقد ألغت كليا الجهد الذي كان يبذله الإنسان في عملية الإنتاج وضاعفت أضعافا كثيرة الكميات المنتجة وذلك لسببين وهما إمكانية زيادة سرعة الإنتاج في غياب العنصر البشري البطيء الاستجابة وكذلك عدم توقف عملية الإنتاج لا في الليل ولا في النهار فالآلات لا يصيبها التعب ولا يغشاها النعاس. هذا بالإضافة إلى أن نوعية المنتج تكاد تكون واحدة في جميع الأوقات حيث أنها لا تتأثر بالمزاج البشري.



ويتم استخدام خطوط الإنتاج بالجملة (mass production) لتصنيع مختلف أنواع السلع وبكميات كبيرة قد تصل إلى آلاف القطع في الدقيقة الواحدة. ويتكون خط الإنتاج من أحزمة متحركة تحمل المادة الأولية أو الهيكل للسلعة المراد تصنيعها ويوجد على طول الحزام محطات متعددة يقوم كل منها بإجراء عمل محدد على السلعة كإضافة قطعة في هيكلها أو تشكيلها إلى أن تنتهي عملية التصنيع وتخرج السلعة بشكلها النهائي. وفي بداية عصر

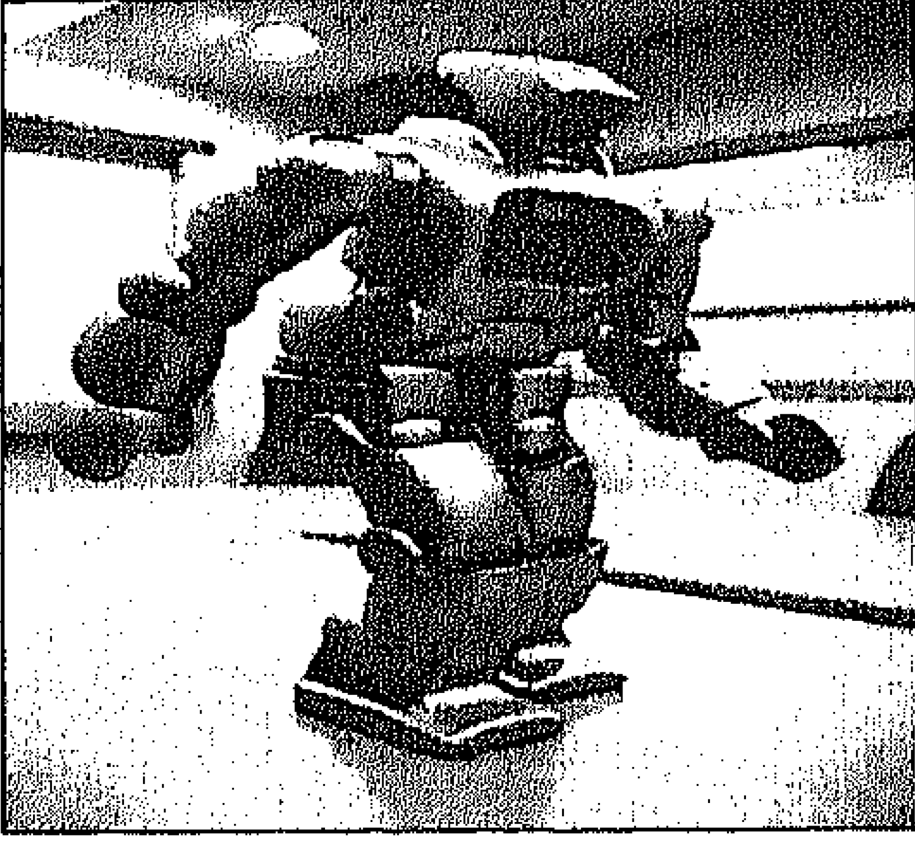
الأتمتة كان الإنسان هو الذي يجلس عند المحطة ويقوم بالوظيفة إلى أن تم استبداله بالآلة أو الإنسان الآلي في معظم خطوط الإنتاج الحديثة.



وتعتبر الماكنات المحكومة رقميا بالحاسوب (computer numerical control (CNC) machines) من أهم الآلات المستخدمة في خطوط إنتاج القطع والهياكل الميكانيكية والتي تقوم عليها بقية الصناعات. وفي هذه الماكنات يتم إنتاج مختلف أنواع القطع اللازمة لبناء مختلف أنواع الأجهزة والمعدات من خلال عمليات القطع والخرط والتفريز والجلخ وذلك بعد أن يتم تصميمها باستخدام برمجيات الحاسوب (computer aided design(CAD)) ومن ثم تحويلها إلى برامج حاسوبية تقوم بتشغيل هذه الماكنات (Computer-aided manufacturing(CAM)).

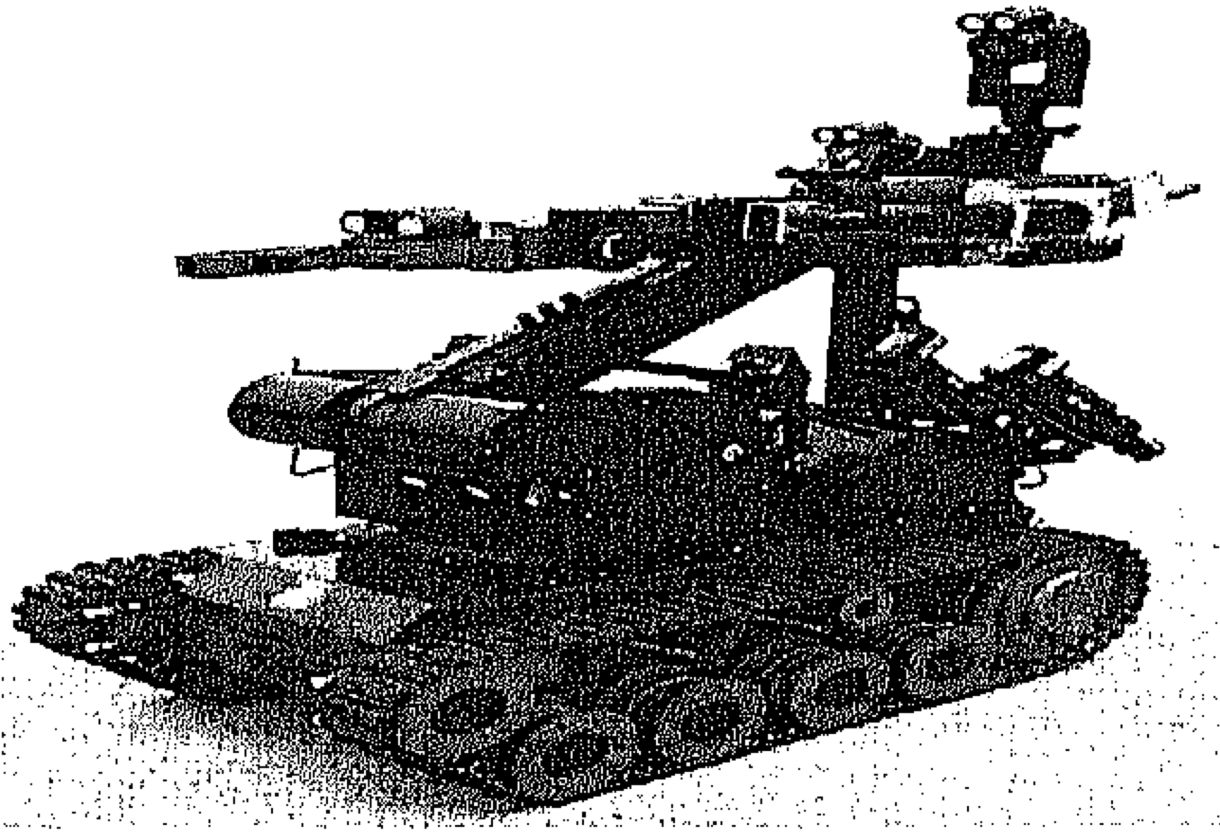
وتستخدم خطوط الإنتاج في تطبيقات لا حصر لها ففي الصناعات الميكانيكية يتم إنتاج قطع الآلات الميكانيكية والمركبات بمختلف أنواعها والمحركات الكهربائية والمعدات والأدوات الصناعية. وفي الصناعات التعدينية يتم إنتاج الهياكل لمختلف أنواع المركبات والطائرات والقطارات والدرجات والأجهزة المنزلية والمكتبية. وفي قطاع الإنشاءات يتم إنتاج القضبان الحديدية والألواح المعدنية والخشبية والأنابيب المعدنية والبلاستيكية والبراغي والمسامير والأسلاك. وفي الصناعات الكهربائية يتم إنتاج القطع الكهربائية والإلكترونية بمختلف أنواعها والأسلاك والوصلات والأباريز والمصابيح والمحولات والمولدات والمحركات والقواطع واللوحات الإلكترونية. وفي الصناعات المنزلية يتم إنتاج مختلف أنواع الأواني والكؤوس والملاعق والشوك والسكاكين المعدنية والزجاجية والبلاستيكية والخزفية. وفي الصناعات الكيماوية والدوائية يتم إنتاج وتعبئة مختلف أنواع المنظفات والمبيدات الزراعية والحشرية والعطور والأدوية. وفي الصناعات الخشبية يتم إنتاج الأثاث المنزلي والمكتبي والأبواب الخشبية والمقاعد الدراسية. ولأغراض الصناعات الزراعية والغذائية يتم إنتاج مختلف أنواع العلب والعبوات والقناني المعدنية والزجاجية والبلاستيكية. وفي الصناعات الورقية يتم إنتاج أنواع ومقاسات مختلفة من الورق لمختلف أنواع الكتب والدفاتر والمفكرات والملصقات والدعايات. وفي صناعة الألعاب يتم إنتاج أنواع لا حصر لها من الألعاب ذات الأجسام المعدنية والخشبية والبلاستيكية. وتستخدم خطوط الإنتاج في تعبئة وتغليف المواد الغذائية المعلبة والألبان والأجبان والعصائر والمياه والمشروبات وإلى غير ذلك من المنتجات التي يصعب حصر أنواعها. وتستخدم في خطوط تجميع مختلف أنواع المركبات والدرجات والمحركات والآلات الصناعية والأجهزة الكهربائية المنزلية والمكتبية وما شابه ذلك. وتستخدم الأتمتة في المناجم وأفران صهر المعادن وتشكيل المعادن والهياكل وفي مصافي البترول مما أبعد الخطر عن العاملين في هذا المجال إلى جانب زيادة الكميات المنتجة. إن الأتمتة تستخدم في تطبيقات أخرى غير عمليات الإنتاج كما في المقاسم الكهروميكانيكية والإلكترونية المستخدمة في شبكات الهاتف والتي حلت منذ بداية القرن العشرين محل البشر في عملية ربط المشتركين ببعضهم عند إجراء المكالمات وتقوم بهذه المهمة بسرعة عالية وبسرية تامة.

الإنسان الآلي (Robot)



يعرف العلماء الإنسان الآلي على أنه جهاز ميكانيكي محكوم بنظام تحكم آلي يمكنه تقليد بعض الحركات أو القدرات التي يقوم بها الإنسان من مشي أو إمساك بالأشياء أو الاستشعار بالمحيط الذي هو فيه أو الاستجابة للكلمات أو الصور أو غير ذلك من المهام. وليس من الضروري أن يكون الإنسان الآلي على شكل الإنسان كما يتبادر لذهن البعض فقد يكون عبارة عن ذراع تقوم مقام ذراع الإنسان في الإمساك بالأشياء ونقلها من مكان إلى مكان. وقد عمل المهندسون على تطوير الإنسان الآلي للقيام بمهام محددة في قطاع الصناعة بدلا من الإنسان وذلك لأسباب متعددة أهمها الخطورة التي قد تقع على الإنسان عند العمل في الأماكن الخطرة أو القذرة أو العمل في الأماكن التي لا يمكن للإنسان أن يعمل بها أو أن يصل إليها كما في البحث عن الألغام أو نقل المخلفات المشعة من المحطات الكهروذرية وغيرها الكثير. ومنها كذلك السرعة والدقة العالية التي يمكن للإنسان الآلي أن ينجز بها المهمة المخصصة له إلى جانب إمكانية عمله بشكل متواصل بلا كلل ولا ملل كما هو الحال مع الإنسان.

لقد بدأ العمل على تطوير الإنسان الآلي منذ بداية القرن العشرين إلا أن الأنواع العملية لم تظهر إلا بعد اختراع الترانزستور والدوائر المتكاملة في بداية النصف الثاني من القرن العشرين فقد تم تصنيع أول إنسان آلي لأغراض الصناعة في عام 1961م وتتلخص مهمته بالإمساك بالقطع المعدنية الحارة ووضعها في أماكن مخصصة له.ا ومع تطور تقنيات أنظمة التحكم الآلي بدأ باستخدام الإنسان الآلي في خطوط تجميع السيارات والمركبات والآليات المختلفة ومن ثم في مختلف أنواع خطوط الإنتاج كتثبيت الدوائر المتكاملة على ألواح الدوائر المطبوعة وتغليف المنتجات. ومع ظهور الحواسيب والمعالجات والمتحكمات الدقيقة واستخدامها في مجال أنظمة التحكم وخاصة المبرمجة منها بدأ المهندسون بتصنيع أنواع من الإنسان الآلي تتمتع بدرجة عالية من الذكاء نسبيا تقوم بمهام ذكية وظهر مصطلح ما يسمى بالذكاء المصطنع (artificial intelligence). وقد تم تصنيع على سبيل الهواية أنواع من الإنسان الآلي على هيئة إنسان يمكنها المشي والإمساك بالأشياء ومعرفة المعيقات التي تعترض طريقها فتتوقف أو تغير مسارها ويمكنها النطق بكلمات كرد فعل لبعض المثيرات. ولكي يستشعر القارئ مدى تعقيد الدماغ البشري والذي يمكن الإنسان من القيام بهذه القدرات العجيبة عليه أن يتخيل كم من أنظمة التحكم والمعالجات الدقيقة ومعالجات الإشارات الرقمية والذاكرات التي يلزم وضعها في الإنسان الآلي لكي يتحرك كما يتحرك الإنسان السوي وأن يمسك بالأشياء كما يمسك ويسمع ويرى ويتكلم ويقرأ ويكتب وصدق الله العظيم القائل في محكم تنزيله "لقد خلقنا الإنسان في أحسن تقويم" التين 4.



الطائرات

تحتاج الطائرات إلى أنظمة تحكم أساسية وذلك للتحكم في حركة جسم الطائرة حول محاور الدوران الثلاث وهي المحور الطولي والذي يمتد من مقدمة الطائرة إلى مؤخرتها ويمكن تحريك جسم الطائرة حول هذا المحور من خلال تحريك أسطح مثبتة على الحواف الخلفية للأجنحة الرئيسية. أما المحور العرضي والذي يقع على امتداد الأجنحة الرئيسية فيتم تحريك جسم الطائرة حوله من خلال تحريك أسطح مثبتة على الحواف الخلفية للأجنحة الخلفية الأفقية وأما المحور الرأسي والذي يمتد من أسفل الطائرة إلى أعلاها فيتم تحريك جسم الطائرة حوله من خلال تحريك أسطح مثبتة على الحواف الخلفية للأجنحة الخلفية الرأسية.

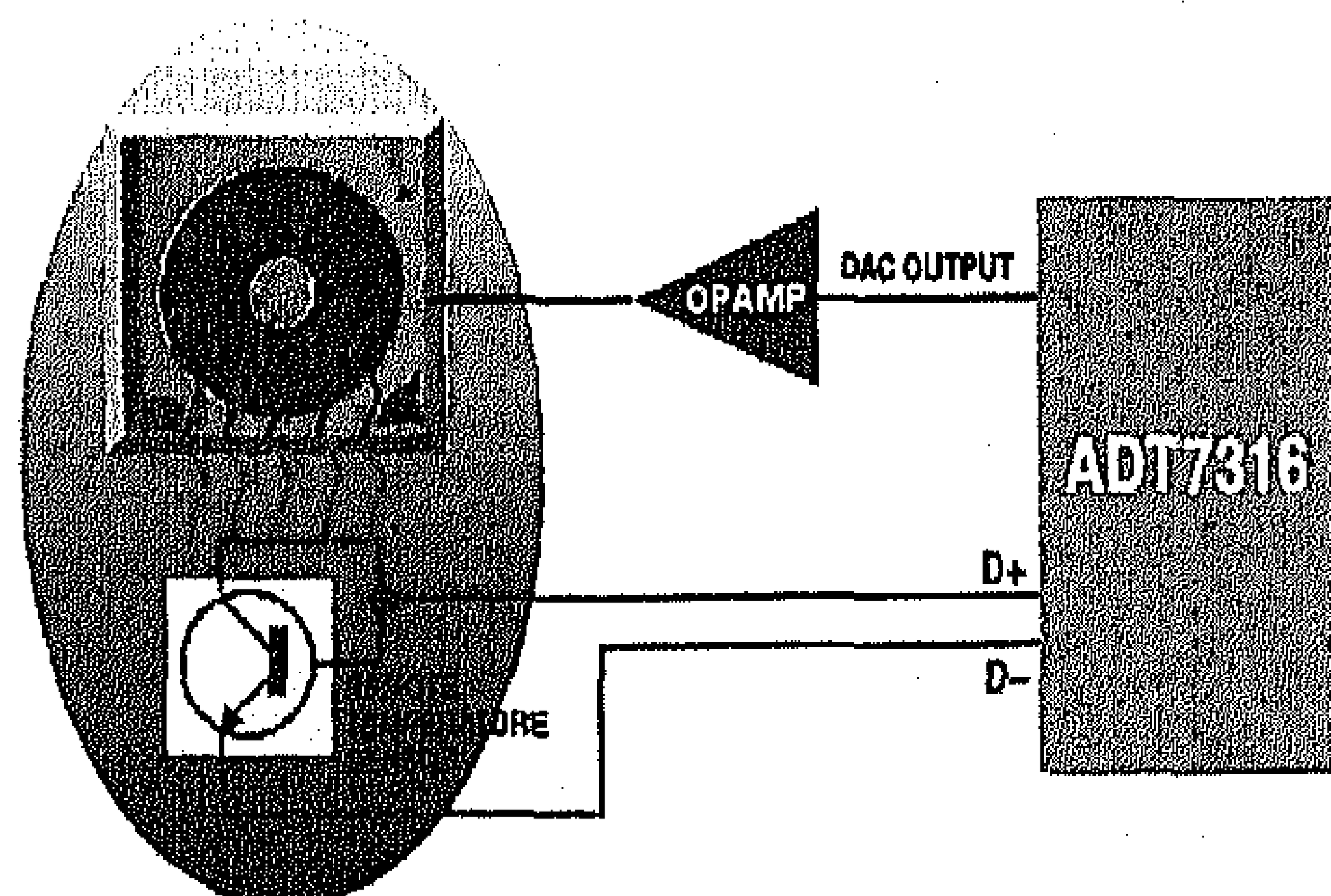


وفي بداية عهد الطائرات التي كانت صغيرة الحجم كان الطيار يتحكم بوضعية هذه الأسطح المتحركة باستخدام عضلاته من خلال شبكة من الأسلاك المعدنية المرتبطة بها. أما في الطائرات الحديثة فإن عملية تحريك هذه الأسطح تتم باستخدام المحركات الكهربائية والتي غالبا ما تكون محكومة من قبل أنظمة تحكم عالية الدقة يتم تشغيلها من قبل الطيار.

وإلى جانب أنظمة التحكم الأساسية يوجد في الطائرات الحديثة المدنية منها والحربية الآلاف من أنظمة التحكم التي تتحكم وتراقب مختلف أجزاء الطائرة كمحركاتها وأجنحتها وخزانات وقودها ودرجة حرارة وضغط داخلها. وإلى جانب أنظمة التحكم البسيطة توجد في معظم الطائرات الحديثة أنظمة تحكم معقدة محكومة بحواسيب كبيرة تساعد الطيار بشكل كبير على قيادة الطائرة خاصة في الظروف الصعبة وذلك عند إقلاعها وأثناء طيرانها وعند هبوطها.

الأجهزة المنزلية والمكتبية

حولت أنظمة التحكم مختلف أنواع الأجهزة المنزلية والمكتبية إلى أجهزة ذكية تقوم بوظائفها بأقل قدر من التدخل البشري فمن خلال كبس بضعة أزرار يستطيع الشخص أن يجعل الجهاز المعني يقوم بالوظيفة المطلوبة منه دون تدخل منه في سلسلة الإجراءات التي يتطلبها إنجاز هذه الوظيفة. ففي التلفزيون كانت تتم عملية التوليف على محطة بث ما وكذلك رفع وخفض الصوت بطريقة يدوية فأصبحت تتم بفضل جهاز التحكم اللاسلكي من خلال كبس الأزرار مع إضافة

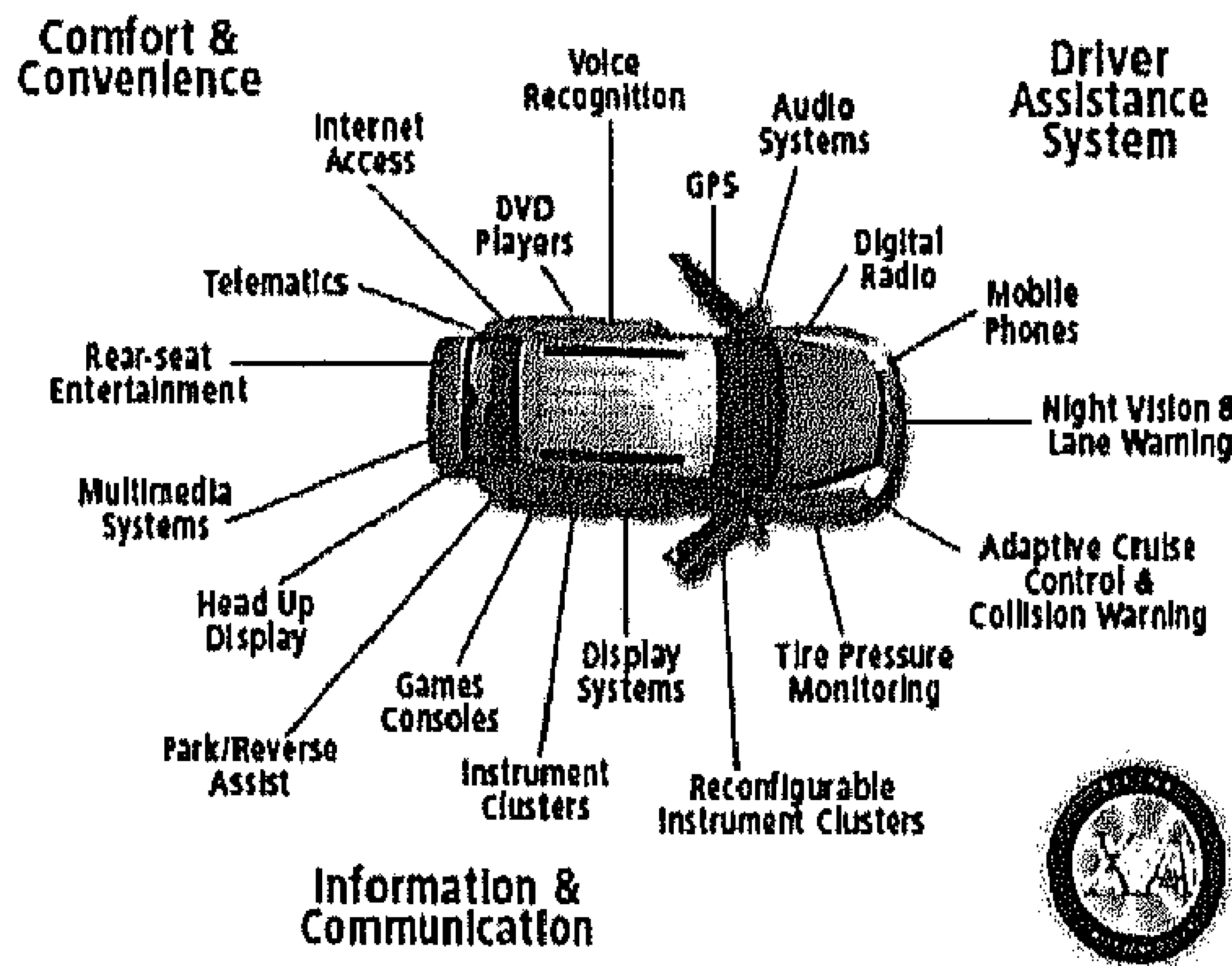


وظائف جديدة لم يكن بالإمكان عملها بدون أنظمة التحكم. وفي الغسالات والجلايات الأوتوماتيكية أصبحت عملية غسل الملابس والصحون تتم بسهولة بالغة من خلال اختيار البرنامج المناسب لعملية الغسل. وفي

المكيفات يقوم المستخدم فقط بتحديد درجة حرارة الغرفة من خلال جهاز التحكم البعدي ومن ثم يقوم نظام التحكم الموجود في المكيف بضبط درجة حرارة الغرفة على القيمة المطلوبة. وتستخدم المتحكمات في المنازل والمكاتب للتحكم في أنظمة الإنارة لتوفير استهلاك الطاقة وفي أنظمة كشف ومكافحة الحرائق. وتستخدم أيضا في الثلاجات والمبردات والمجمدات لضبط درجة الحرارة المناسبة وفي الأفران العادية والكهربائية وأفران الميكروييف لضبط درجة الحرارة ومدة التشغيل. وفي المكاتب تستخدم المتحكمات في آلات التصوير وأجهزة الفاكس ما على المستخدم إلا وضع الورقة المراد تصويرها في المكان المناسب ويحدد عدد النسخ ونوعية الصورة التي يريدها من خلال لوحة التحكم ومن ثم يتولى نظام التحكم بإجراء ما تبقى من خطوات التصوير.

المركبات والقطارات والسفن والآليات

يوجد في المركبات والآليات الحديثة عشرات وقد تصل المئات من أنظمة التحكم أو المتحكمات يقوم بعضها بوظائف مهمة تضمن أداء جيد لمختلف أنظمة المركبة أو الآلية وبعضها يعمل على إراحة مستخدمي هذه المركبات والآليات من عناء كثير من الوظائف التي كانوا يقومون بها بأنفسهم. إن أهم وأعقد المتحكمات هو ذلك المسؤول عن حسن أداء المحرك (engine controller) حيث يعمل أولا على ترشيد استهلاك الوقود وثانيا على تقليل نسبة الانبعاث الضار من عوادم تلك المركبات والآليات. ففي نظام التحكم هذا يوجد مجموعة من الحساسات تقيس مستوى الأكسجين في العادم وسرعة المحرك ودرجة حرارة المبرد ومن ثم يقوم بإرسال إشارات التحكم المناسبة إلى مغذيات الوقود والهواء بعد تحديد النسبة الصحيحة بينهما وكذلك إشارات إلى نظام الإشعال. وتقوم متحكمات آخرى بمراقبة حالة المحرك بشكل كامل كدرجة حرارته ومستوى الزيت والماء وحالة مروحة التبريد وشمعات الإشعال وكذلك مراقبة بقية أنظمة المركبة وعرضها على شاشة أمام السائق وإنذاره إذا ما حصل أي عطل. وتوجد متحكمات كذلك في نظام نقل التروس الآلي (automatic transmission gear) لتحديد الوضعية المناسبة للتروس عند السرعات المختلفة وفي نظام القيادة المقوى الإلكتروني (electronic power steering) وفي أنظمة الكوابح الآلية (automatic braking system). وكذلك في الوسائد الهوائية التي تحمي السائق عند وقوع الحوادث وفي تحديد البعد عن المركبات المجاورة وكذلك حواف الطريق وفي أنظمة حفظ الإتزان. ويوجد متحكمات عديدة تساعد السائق في فتح وإغلاق النوافذ وضبط المقاعد والمرايا والأضوية والمساحات والهوائيات والمسجلات والراديو من خلال كبس الأزرار دون بذل أي جهد يذكر. وفي القطارات نجد إلى جانب أنظمة التحكم المستخدمة في مختلف أجزاء القطار نجد أنظمة تحكم معقدة تنظم سير القطارات المختلفة التي تستخدم نفس نظام السكك الحديدية. وفي السفن نجد أنظمة تحكم متعددة بعضها لحفظ اتزانها وعدم تأرجحها رغم



وجود الأمواج والرياح العاتية وبعضها لمراقبة محركاتها ومولداتها وبعضها لتسهيل عملية قيادتها وإلى غير ذلك من المهام. أما الآليات المستخدمة في مختلف القطاعات كالقطاع الزراعي وقطاع الإنشاءات وقطاع النقل فإن أنظمة التحكم التي زودت بها جعلت منها آليات ذكية جدا خففت كثيرا من الجهد الذي يبذله سائقي ومشغلي هذه الآليات بالإضافة على إمكانية التحكم بها عن بعد خاصة في الأماكن الخطرة.

تقنية المعلومات والاتصالات

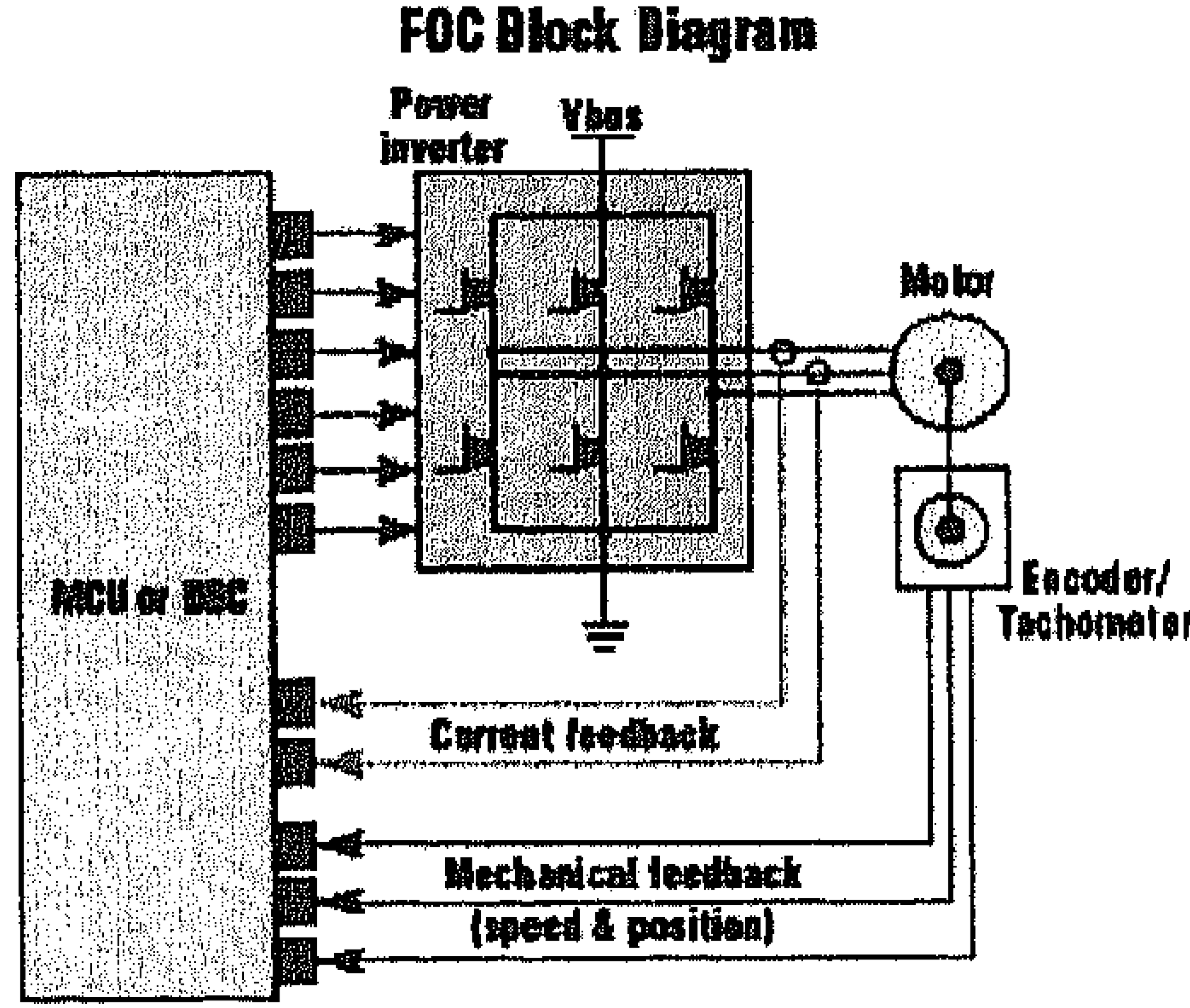
تستحوذ الأجهزة والمعدات المستخدمة في تقنية المعلومات والاتصالات على نصيب الأسد من المتحكمات الدقيقة وكذلك المعالجات الدقيقة. فالحاسوب الشخصي مع ملحقاته وبنوعيه المكتبي والمحمول يحتاج لعشرات من المتحكمات الدقيقة موجودة في الأقراص الصلبة والمرنة والمدمجة وفي لوحات المفاتيح والطابعات والماسحات وحتى في الفارات وفي كروت الشاشة والصوت وبقية أنواع الكروت التي يتم وصلها باللوحة الأم للحاسوب. أما بقية أنواع الحواسيب والأجهزة المستخدمة في مختلف أنواع شبكات الحواسيب كالخادمات والمسيرات والبوابات وغيرها فيحتوي كل منها على عدد كبير من المتحكمات التي تقوم بوظائف مختلفة. إن وجود المتحكمات في الأجهزة الملحقة بأجهزة الحواسيب تخفف العبء بشكل كبير عن وحدة المعالجة المركزية لهذه الحواسيب فمثل هذه الأجهزة تقوم بوظائف روتينية بفضل أن يقوم المتحكم بها بدلا من الحاسوب. وكذلك هو الحال مع أجهزة ومعدات الاتصالات فهي تحتاج لمتحكمات دقيقة للقيام بوظائف كثيرة فبعض الأجهزة كالهواتف الثابتة تقوم بوظيفتها بدون الحاجة لمتحكم دقيق ولكن استخدام المتحكمات فيها يحولها إلى أجهزة ذكية تريح مستخدميها حيث يمكنهم تخزين أرقام الهواتف في الذاكرة وإظهار رقم الهاتف الطالب وإعادة طلب الرقم دون إدخاله من جديد وغير ذلك من المهام. أما الهواتف الخلوية فما كان لها أن تظهر بدون وجود المتحكمات والمعالجات الدقيقة فهذه الهواتف تحتاج للتخاطب مع المحطات القاعدية (base station) بشكل مستمر لتحديد الترددات التي سيستخدمها المستخدم ولا يمكن أن يتم ذلك بدون وجود المتحكمات. هذا بالإضافة إلى أن الهواتف الخلوية أصبحت تقوم بمهام لا حصر لها غير المهمة التي صنعت من أجلها وهي إجراء المكالمات الهاتفية كاستخدامها ككميرات للتصوير ومسجلات سمعية ومرئية وغير ذلك من المهام التي يلزمها وجود المتحكمات. وتستخدم المتحكمات الدقيقة بكثرة في المقاسم الإلكترونية بمختلف أنواعها وفي مرسلات ومستقبلات ومعيدات مختلف أنواع أنظمة الاتصالات وفي أجهزة استقبال الراديو والتلفزيون وفي المسجلات السمعية والمرئية.



محطات التوليد والمحركات الكهربائية

تحتاج محطات توليد الكهرباء بمختلف أنواعها أنظمة تحكم بالغة التعقيد فهذه المحطات تحتوي على مولدات كهربائية تولد طاقة كهربائية تقدر بمئات الميجاوات وتدار هذه المولدات بتوربينات بخارية وغازيـــة

تستمد طاقتها من حرق كميات ضخمة من مشتقات البترول أو الغاز أو الفحم أو من المفاعلات الذرية. إن أي تغيير في الحمل الكهربائي الموصول بهذه المولدات يحتاج لتغيير فوري بكمية الطاقة الحرارية المغذاة للمحركات الرئيسية بما يتناسب مع الحمل وإلا خرج النظام عن السيطرة مما يسبب دمارا شاملا في المحطة. وغالبا ما يوجد مئات أو ربما آلاف المتحكمات المستخدمة للتحكم في الأجهزة والمعدات الفرعية للمحطة إلى جانب نظام تحكم رئيسي يستخدم حواسيب كبيرة للتحكم بكامل المحطة ويعطى حالة جميع متغيرات نظام التوليد. وللتدليل على كفاءة أنظمة التحكم في إدارة هذه المحطات نجد أن صالات واسعة تمتلئ بأجهزة المراقبة والتحكم يتم إدارتها ومراقبتها من قبل عدة أشخاص. إن أكثر ما تستخدم أنظمة التحكم هو في المحركات الكهربائية التي أحدث اختراعها في النصف الثاني من القرن التاسع عشر ثورة في مختلف مجالات الحياة لا تقل أهمية عن الثورة التي أحدثها محرك الاحتراق الداخلي بل يزيد عنه بكثير وذلك بسبب ميزاته المتعددة. ومن أهم ميزات المحرك الكهربائي بالمقارنة مع محركات الاحتراق الداخلي هو إمكانية تصنيعها بأحجام وقدرات تتراوح من الصغيرة جدا التي يمكن وضعها في الساعات إلى الكبيرة جدا والتي تستخدم كمحركات في القطارات والسفن والرافعات العملاقة وكذلك إمكانية التحكم بسرعة دورانها بدقة كبيرة جدا على مدى واسع من السرعات. هذا بالإضافة إلى كفاءتها التحويلية العالية التي تزيد في معظم أنواعها عن التسعين بالمئة وهذه الميزة لا تقلل فقط كمية الطاقة الكهربائية المستهلكة بل تقلل من كمية الحرارة المتولدة مما يشجع على وضعها في مختلف أنواع الأجهزة دون الخوف من تسببها في إحداث الحرائق وكذلك عمرها التشغيلي الطويل وقلة الحاجة لصيانتها وعدم خروج أية عوادم منها. أما الميزة التي تهمنا فهي سهولة التحكم بها فتشغيلها وإيقافها يتم في ثواني معدودة وبالإمكان التحكم بسرعة هذه المحركات بدقة عالية جدا لتلبي حاجات مختلف التطبيقات.

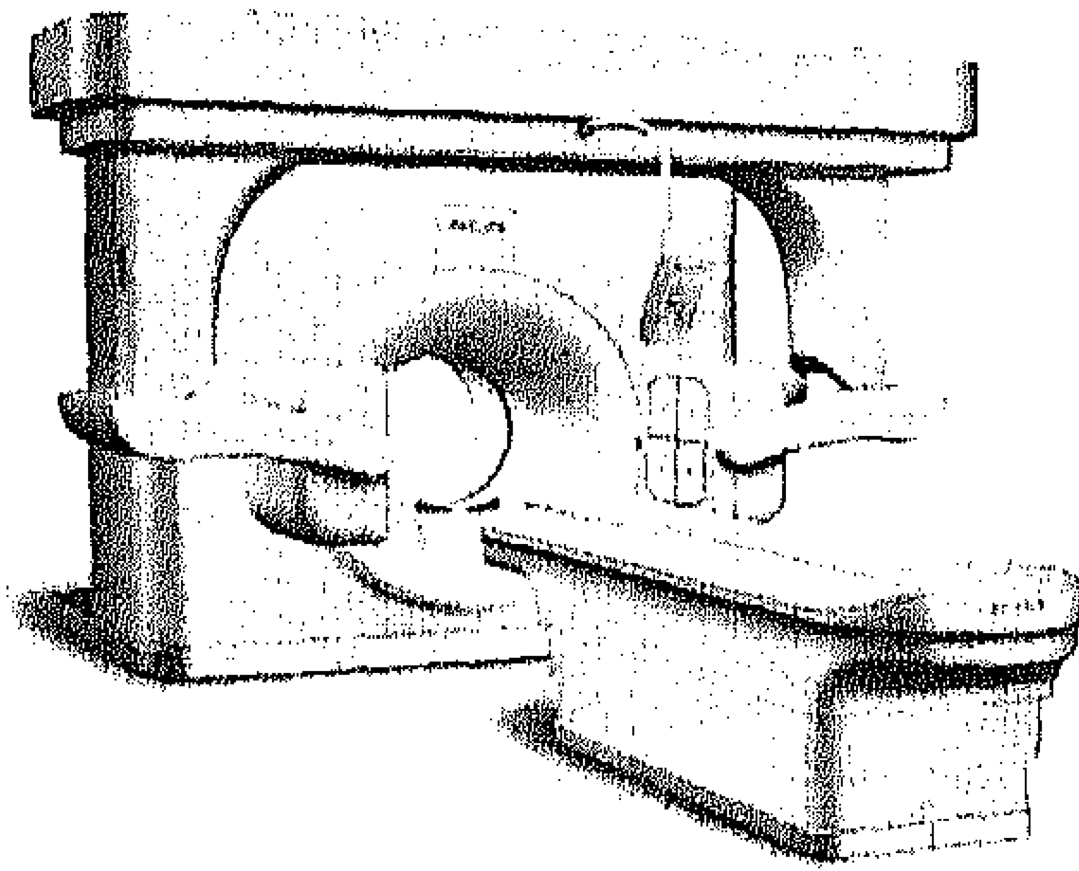


وباستخدام أنظمة التحكم في هذه المحركات الكهربائية تم تصنيع أجهزة ومعدات ذكية جدا وظهرت أجهزة ومعدات لا حصر لها ما كان لها أن تظهر لولا ذلك. ففي المنازل انتشر استخدام الثلاجات والغسالات والجلايات والخلاطات والشوايات ومجهزات الطعام والمكيفات والدفايات والمراوح والشفاطات والمضخات. وفي العمارات والمتاجر والمباني العامة متعددة الطوابق تم استخدام المصاعد والسلالم الكهربائية لتسهيل صعود ونزول الناس. وبفضل المحرك الكهربائي والمتحكمات تم تحويل مختلف أنواع المصانع وخطوط الإنتاج إلى أنظمة آلية تعمل على مدار اليوم وحلت محركات بحجم قبضة اليد محل الإنسان الذي كان يقوم بهذه المهمة فتقلصت بذلك أحجام المصانع وزادت كميات إنتاجها. وفي الطائرات بمختلف أنواعها وأحجامها تم استخدام المحركات الكهربائية بوجود أنظمة التحكم الذكية في كثير من أجزاء الطائرة وقد كان الفضل في ظهور الطائرات كبيرة الحجم للمحرك الكهربائي. وكذلك أصبحت السيارات أكثر رفاهية حيث تستخدم الأزرار في التحكم بكثير من أجزائها كالأبواب والشبابيك والمرايا والمقاعد والهوائيات وغيرها. وتم استخدام المحركات والمتحكمات بكفاءة عالية في الساعات والمسجلات السمعية والمرئية ومحركات

أقراص الحواسيب بمختلف أنواعها وفي الطابعات والماسحات والفاكسات وآلات التصوير والألعاب وإلى غير ذلك من التطبيقات التي يصعب حصرها.

الأجهزة الطبية والمخبرية

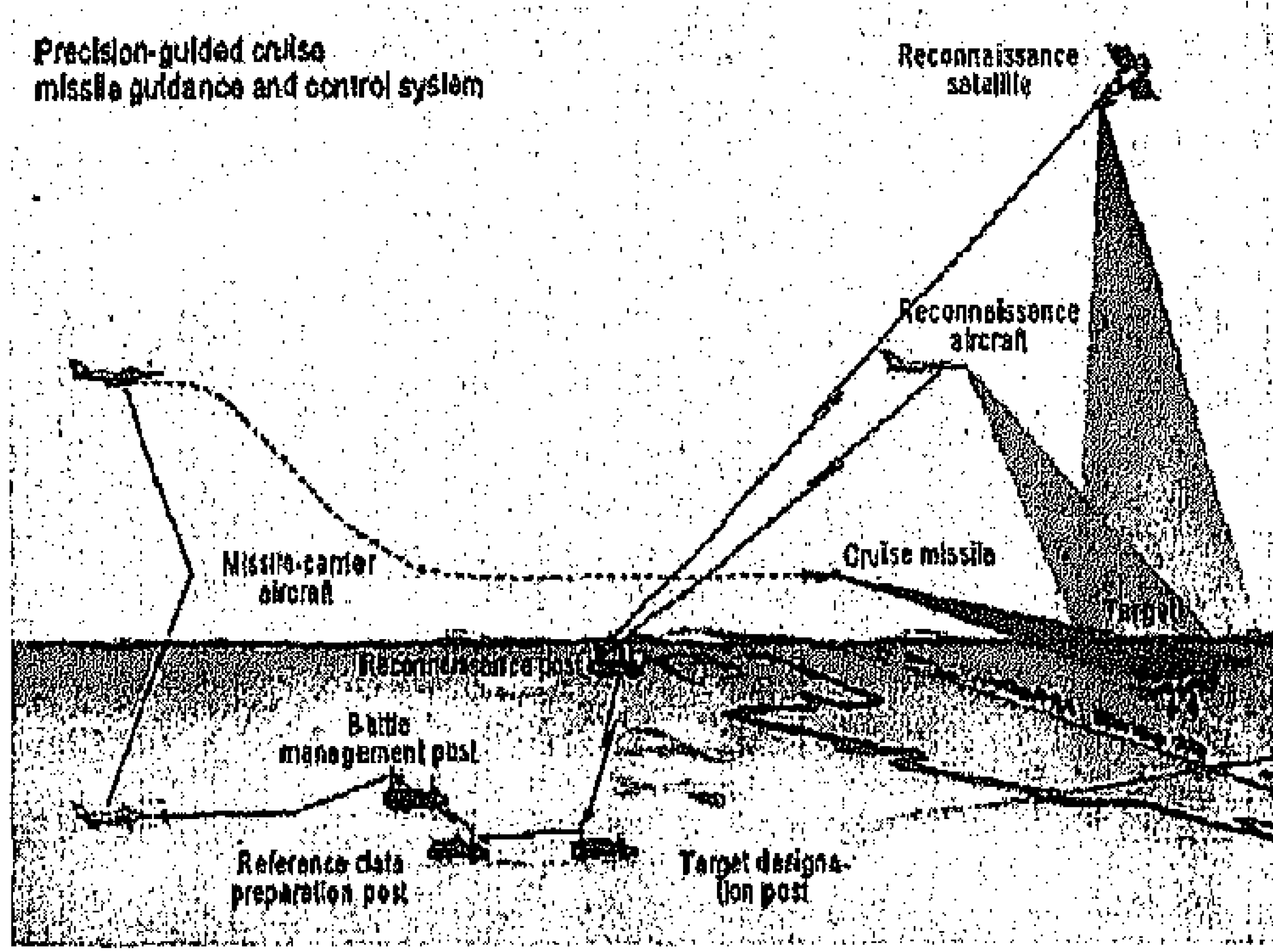
لقد لعبت أنظمة التحكم الكهربائية دورا كبيرا في ظهور هذا الكم الهائل من الأجهزة الطبية والمخبرية والتي ساعدت الأطباء في تشخيصهم وعلاجهم لكثير من الأمراض وساعدت الممرضين كذلك في مراقبتهم للمرضى وفنيي المختبرات في إجراء تحاليلهم للعينات بشكل أسرع وبنتائج أكثر دقة. فمعظم الأجهزة الطبية والمخبرية تحتاج للقيام بعدة إجراءات لكي تتمكن من الحصول على النتيجة النهائية وغالبا ما يتطلب القيام بهذه الإجراءات في فترات زمنية محددة ومتتالية مما يلزم استخدام أنظمة تحكم ذكية. وتتراوح المتحكمات بين البسيطة جدا كما في قياس درجة الحرارة والمعقدة جدا وتلك التي يلزم وجود حواسيب كبيرة ومعالجات للإشارات الرقمية (DSP) للقيام بوظيفتها كما في أجهزة التصوير بالرنين المغناطيسي والمقطعي. ومن الصعب حصر أنواع الأجهزة الطبية الحديثة لكثرتها فهناك أجهزة التشخيص كأجهزة قياس النبض والضغط ودرجة الحرارة وأجهزة قياس مستوى السكر والأكسجين في الدم وأجهزة تحليل الدم وأجهزة تخطيط القلب والدماغ وأجهزة التصوير بمختلف أنواعها كالأشعة السينية والرنين المغناطيسي والتصوير المقطعي والموجات الفوق صوتيه وأجهزة التنظير والمناظير بمختلف أنواعها وأجهزة المختبرات الطبية بمختلف أنواعها. وهناك أجهزة العلاج كأجهزة التنفس الصناعي وأجهزة تفتيت الحصى وأجهزة غسيل الكلى وأجهزة القلب والرئة الصناعيين وأجهزة تصحيح البصر بأنواعها وأجهزة الجراحة وأجهزة القسطرة وأجهزة العلاج بالإشعاع. وكذلك الأجهزة الطبية المساندة كالأسرة الطبية وحاضنات الأطفال وأجهزة الإنعاش وأجهزة التخدير وأجهزة مراقبة المرضى وأجهزة العلاج الطبيعي وأجهزة أطباء الأسنان.



الأسلحة والمعدات العسكرية

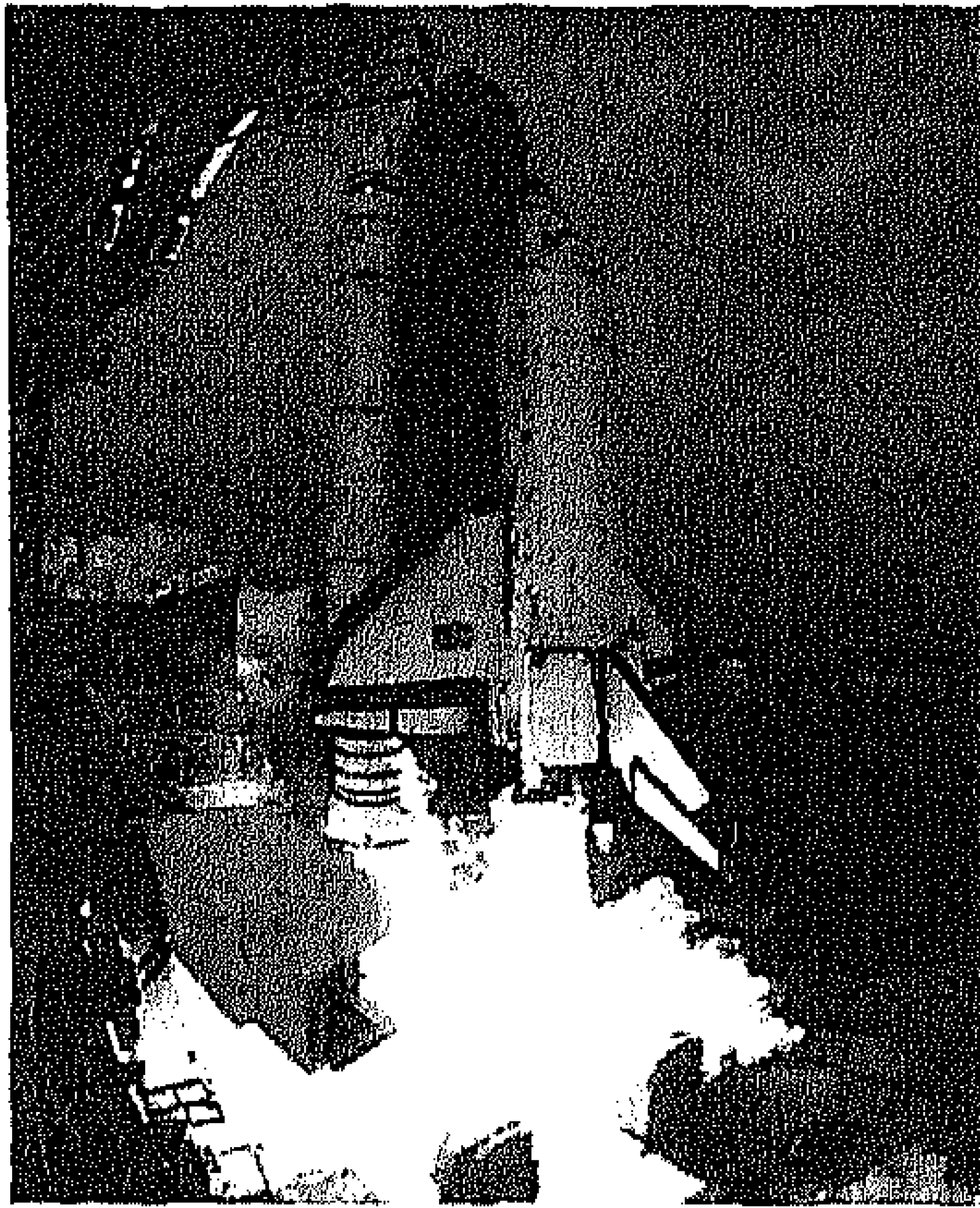
تستخدم أنظمة التحكم بكثرة في مختلف أنواع الأسلحة والمعدات العسكرية وغالبا ما تكون هذه الأنظمة أعقد من تلك المستخدمة في التطبيقات المدنية بسبب الكلفة العالية للمعدات العسكرية وتعقيد المهام التي تقوم بها. ففي الطائرات الحربية يوجد إلى جانب أنظمة التحكم الموجودة في الطائرات المدنية أنظمة تحكم معقدة تساعد الطيار على القيام بمهمات طيران بالغة التعقيد والخطورة وأخرى لتوجيه الأسلحة التي تحملها الطائرة نحو أهدافها المتحركة والثابتة بطريقة ذاتية ودون تدخل يذكر من الطيار ورغم أن الطائرة تطير بسرعات عالية جدا. وفي السفن والبارجات والغواصات الحربية وكذلك الدبابات والمدافع وبقية الآليات

العسكرية توجد أنظمة تحكم معقدة تساعد الجنود على تصويب الرشاشات والمدافع والصواريخ باتجاه الأهداف بشكل بالغ الدقة. وتوجد أنظمة التحكم أيضا في القذائف الحربية بمختلف أنواعها وخاصة الصواريخ منها حيث تعمل هذه الأنظمة على توجيه الصواريخ نحو أهدافها بشكل بالغ الدقة ويتم تحديد موقع الهدف بطرق مختلفة كتسليط شعاع من الليزر المشفر على الهدف من قبل الطائرة التي أطلقت الصاروخ أو طائرة أخرى ويستخدم نظام التحكم ضوء الليزر المنعكس عن الهدف في توجيه مسار الصاروخ نحو الهدف. وتستخدم أنظمة التحكم أيضا الإشعاعات الكهرومغناطيسية التي تطلقها بعض الأهداف كالرادارات ومحطات البث الإذاعي والتلفزيوني والآليات العسكرية في توجيه الصواريخ باتجاهها ومن ثم تدميرها. ومع ظهور نظام تحديد الموقع العالمي (GPS) أصبحت أنظمة التحكم بالصواريخ تعمل من خلال تزويدها بإحداثيات الهدف ومن ثم مقارنته مع موقع الصاروخ في كل لحظة من خلال نظام تحديد الموقع ومن ثم توجيه مسار الصاروخ في الاتجاه الذي يوصله للهدف.

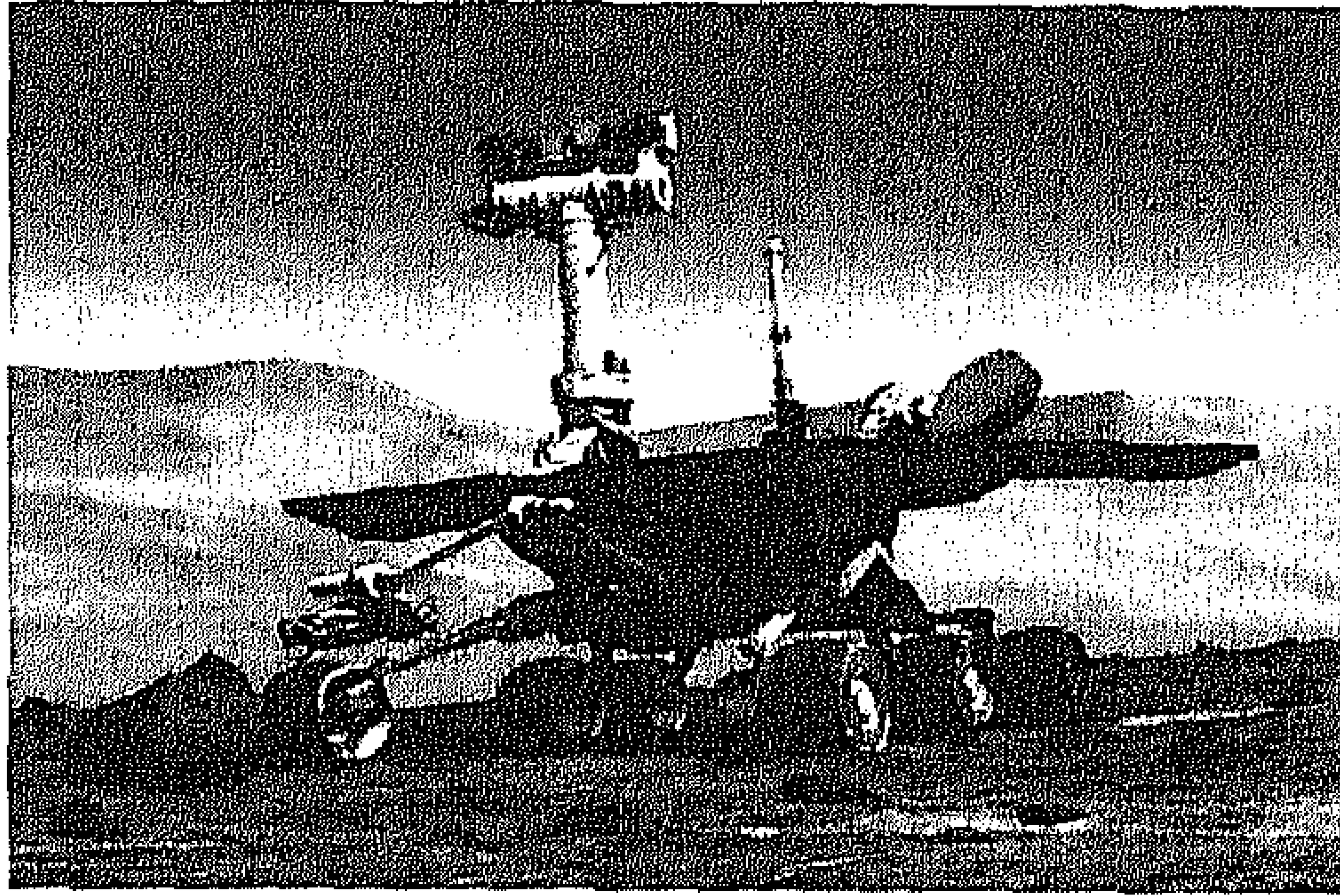


الأقمار الصناعية والمركبات والمحطات الفضائية

تحمل الأقمار الصناعية والمركبات الفضائية على ظهرها أجهزة ومعدات بالغة التعقيد وتستمد الطاقة اللازمة لتشغيلها من الشمس من خلال الخلايا الضوئية وتحتاج هذه الأجهزة والمعدات إلى المئات من أنظمة التحكم لضمان عملها لفترات طويلة من الزمن قد تصل إلى عشرين عاما وخاصة أنها بعيدة عن متناول يد الإنسان. فالأقمار الصناعية تحتاج لعدد من أنظمة التحكم المعقدة التي تعمل على إبقاء القمر في المدار المخصص له وكذلك في الموقع المخصص في المدار حيث أن القمر ينزاح عن موقعه بشكل بطيء بسبب الجسيمات التي تصطدم بجسمه من الفضاء الخارجي وذلك لا بد من إرجاعه إلى موقعه كل حين باستخدام محركات صغيرة. ويحتاج كذلك إلى أنظمة تحكم تعمل على إبقاء محور القمر موجها باتجاه ثابت بالنسبة إلى الأرض وتقوك كذلك بتوجيه الهوائيات المختلفة بشكل دقيق باتجاه مناطق تغطيتها على سطح الأرض. وتقوم أنظمة التحكم في القمر الصناعي كذلك في التحكم في أنظمة توليد وتنظيم الطاقة الكهربائية التي تزود مختلف مكونات القمر بالطاقة اللازمة لتشغيلها. وإلى جانب التحكم الذاتي في بعض أجهزة ومعدات القمر فإنه يلزم في كثير من الأحيان التحكم في بعض المعدات وإصلاح بعض الأعطال من قبل محطات المراقبة والتحكم المخصصة لذلك القمر.



أما المركبات الفضائية فإن عدد أنظمة التحكم المستخدمة فيها لا يقل عن تلك التي في الأقمار الصناعية إن لم يزد عن ذلك بكثير وذلك حسب حجمها وحسب المهام التي تقوم بها. إن عملية التحكم في مسار مسابير فضائية (space probes) تسبح في الفضاء على بعد مئات الملايين من الكيلومترات من الأرض وكذلك التحكم في المركبات التي تنزلها على سطوح الكواكب وفي الأجهزة العلمية التي تحملها من آلات تصوير وأجهزة تحليل لمحتويات أجواء الكواكب أو تربتها عملية بالغة التحدي للمهندسين. وبسبب أن الأوامر التي ترسل من الأرض إلى هذه المركبات قد تستغرق عشرات الدقائق فإن عملية التحكم بها وبأجهزتها عملية بالغة الصعوبة ولذلك يستعاض عنها بأنظمة تحكم بالغة الذكاء مدمجة في تلك الأجهزة ولا يلزمها إلا قليلا من الأوامر لتشغيلها من الأرض. إن وضع الأقمار الصناعية في مداراتها حول الأرض أو إخراج المركبات الفضائية خارج نطاق الجاذبية الأرضية لتسبح باتجاه الكواكب تحتاج لصواريخ دفع جبارة لتحملها من سطح الأرض إلى الفضاء. إن عملية إطلاق هذه الصواريخ عملية بالغة التعقيد وتحتاج لحسابات رياضية معقدة لا يمكن أن تجرى إلا من قبل الحواسيب والتي تحدد مسار وسرعة الصواريخ في كل لحظة زمنية بعد إطلاقها إلى أن تفرغ حمولتها. وغالبا ما تتم عملية الإطلاق تحت سيطرة أنظمة تحكم متعددة بعضها موجود في الصاروخ وبعضها في المحطة الأرضية التي تحتوي على الحواسيب التي تتحكم بعملية الإطلاق ولا يتعد دور الإنسان إلا العد العكسي وضغط زر الإطلاق.

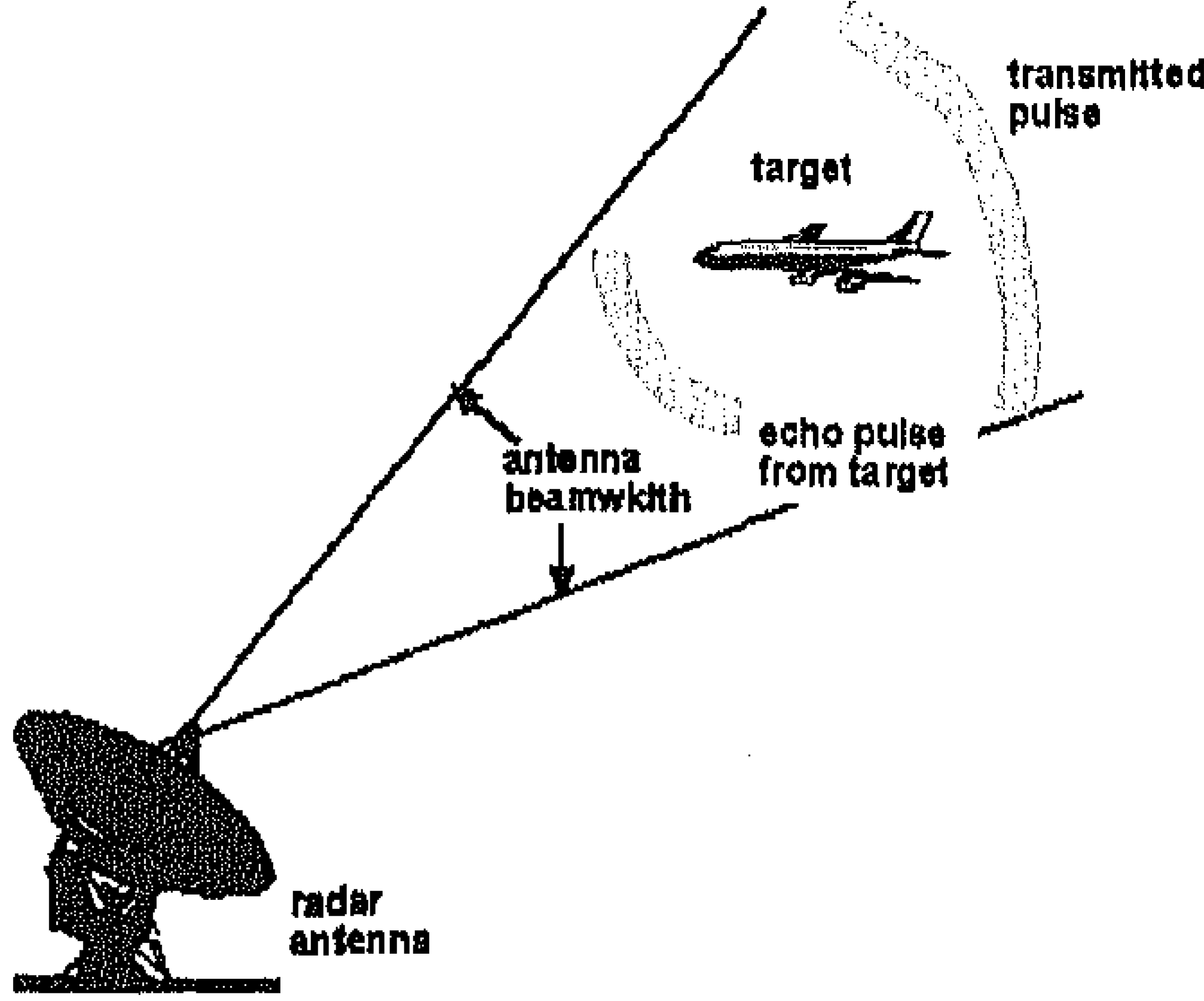


ولا تقتصر استخدامات أنظمة المتحكمات على هذه المجالات المذكورة آنفا فهي موجود في مختلفة أجهزة القياس الكهربائية كما في راسمات الذبذبات (oscilloscopes) ومحللات الطيف (spectrum analyzers) ومحللات المنطق (logic analyzers) وفي الأجهزة الرقمية لقياس التيار والجهد والتردد والمقاومة والمحاثة والمواسعة والمعاوقة وفي مصادر الطاقة (power supplies) ومولدات الإشارات (function generators). وتوجد المتحكمات بكثرة في الأجهزة العلمية والمخبرية وفي أجهزة البحث العلمي المستخدمة في جميع التخصصات العلمية وفي أجهزة المختبرات الطبية. وتستخدم أنظمة التحكم في القطاع الزراعي في البيوت البلاستيكية للحفاظ على درجة حرارة ورطوبة مناسبة وفي أنظمة الري لترشيد استهلاك المياه وفي مكافحة حرائق الغابات. وتستخدم أنظمة التحكم في أجهزة ورش إصلاح المركبات وفي المطابع ومغاسل الملابس ومحطات صيانة السيارات ومصانع النسيج وفي المصاعد وفي ورش الحدادة والنجارة والخياطة ومعدات الإنشاءات وفي غير ذلك من التطبيقات التي يصعب حصرها.

الفصل التاسع

أنظمة الرادار

9-1 تمهيد



الرادار هو نظام إلكتروني يستخدم الموجات الكهرومغناطيسية لتحديد إحداثيات موقع الأجسام الثابتة والمتحركة في الفضاء وكذلك اتجاها وسرعتها إذا كانت متحركة وكذلك تحديد طبيعة هذه الأجسام إن أمكن. وكلمة رادار (radar) هي كلمة إنكليزية مكونة من الأحرف الأولى لجملة (Radio Ranging And Detection) والتي تعني كشف وتحديد البعد بالراديو. إن طريقة عمل الرادار تعتمد على مبدأ بسيط وهو أن الموجات الكهرومغناطيسية عندما تسقط على جسم ما فإن قسما منها سينعكس عنه وغالبا ما ينتشر جزء من الموجات المنعكسة بالاتجاه المعاكس للموجات الساقطة. وعلى هذا الأساس فإن الرادار يقوم بإرسال موجه كهرومغناطيسية في اتجاه ما وإذا ما ارتدت هذه الموجة إلى الرادار فإن هذا يعني وجود هدف ما في ذلك الاتجاه فيقوم بمعالجة الموجة المرتدة لتحديد موقع الهدف وكذلك سرعته واتجاه سيره. وتستخدم بعض الكائنات الحية كالوطاويط (bats) نظام رادار طبيعي بدلا من الأعين لرؤية ما حولها حيث تقوم بإرسال نبضات بترددات فوق صوتية تطلقها من أنوفها وعندما ترتد هذه الموجات من الأجسام المحيطة تقوم بالتقاطها بآذانها ثم تقوم أدمغتها برسم صورة ثلاثية الأبعاد لما يحيط بها فتطير على هديها.

وإذا كانت أنظمة الاتصالات قد ساعدت البشر للتحدث مع بعضهم وكذلك رؤية بعضهم رغم المسافات التي تفصل بينهم فإن الرادار قد ساعد البشر على رؤية الأجسام التي لا يمكنهم رؤيتها بأعينهم إما لبعدها عنهم أو نتيجة حجبها بالضباب الكثيف أو الغيوم أو المطر أو الثلج أو الغبار أو لكونها مخفية تحت طبقات الأرض أو في أعماق البحار. ويستخدم الرادار الآن للقيام بمهام لا حصر لها ففي التطبيقات العسكرية يتم استخدامه كوسيلة للإنذار المبكر من الطائرات الحربية المعادية وفي توجيه الدفاعات الجوية والصواريخ إلى أهدافها وفي كشف مواقع المعدات الحربية المعادية وكشف الألغام وفي التطبيقات المدنية يتم استخدامه في الملاحة الجوية لتوجيه حركة الطائرات وتسهيل هبوطها في المطارات وفي الملاحة البحرية لتوجيه حركة السفن وتجنيبها التصادم مع بعضها أو بمعدات الموانيء. ويستخدم الرادار في الأرصاد الجوية لرسم صور لحركة الغيوم والرياح والأمطار والثلوج والمنخفضات والمرتفعات الجوية والأعاصير والعواصف الرملية مما يساعد على الحصول على تنبؤات جوية دقيقة. وتستخدم الرادارات المحمولة بالأقمار الصناعية والطائرات لدراسة سطح الأرض وما عليها واستخدام هذه المعلومات لمعرفة طبيعة التضاريس الأرضية وطبوغرافيتها ونوع الغابات والنباتات والمحاصيل المزروعة والآفات الزراعية والظروف المناخية والبيئية

والبراكين والأعاصير والفياضانات والثروات المعدنية والمياه الجوفية والبترول. وتستخدم الشرطة الرادارات لكشف السرعات الزائدة للمركبات على الطرق وذلك للحد من الحوادث.

9-2 تاريخ الرادار

ظهرت فكرة استخدام الموجات الكهرومغناطيسية لكشف الأهداف مع اكتشاف الأمواج الكهرومغناطيسية في عام 1887م على يد الفيزيائي الألماني هنيرتش هيرتز (Heinrich Hertz) والذي اكتشف أيضا أن هذه الأمواج تنعكس عند اصطدامها بالأجسام المعدنية والعازلة. وفي عام 1903م تمكن المهندس الألماني كريستيان هولسماير (Christian Hulsmeyer) من إجراء تجربه تمكن من خلالها كشف وجود سفينة من خلال الضباب ولكن دون تحديد المسافة. وفي عام 1921م تمكن ألبرت هول (Albert Hull) من اختراع أول أشكال الصمام الإلكتروني المسمى بالمجنيترون (Magnetron) وهو مذبذب قادر على توليد ترددات عالية جدا وبقدرات عالية. وفي عام 1922م ظهر أول نظام لرادار طويل المدى نسبيا على يـــــدي العــــــالم الايطالي المشهور ماركوني (Marconi). وفي عام 1930م تمكن المهندس الأمريكي هايلاند (Lawrence A. Hyland) وهو في مختبر البحرية الأمريكية من كشف أول طائرة باستخدام ما يسمى نظام كشف الأهداف بالراديو (الأمواج الكهرومغناطيسية) وكان التردد المستخدم ثلاثة وثلاثين ميجاهيرتز. وفي عام 1934م تمكنت البحرية الأمريكية من تصميم أول رادار نبضي لكشف وجود الطائرات دون تحديد بعدها وكان يعمل على تردد ستين ميجاهيرتز وقد وصل مداه لأربعين كيلومتر. وفي 1935 حصل العالم الإنكليزي واتسون واط (Watson-Watt) على براءة اختراع لرادار يستطيع أن يحدد المسافة. وفي عام 1936م تم اختراع صمام إلكتروني آخر وهو الكلايسترون (Klystron) والذي يستخدم لتوليد وتضخيم الإشارات في نطاق الأمواج الدقيقة وقد لعب مع الميجنيترون دورا كبيرا في تطوير أنظمة الرادار الحديثة. وفي عام 1937م تم تركيب أول رادار على ظهر المدمرة الأمريكية "ليري" وظهرت كذلك الرادارات التي تتحكم في المدافع المضادة للطائرات الحربية ورادارات الإنذار المبكر بعيدة المدى.

وفي عام 1939م تم اختراع المجنيترون ذي الفجوة (cavity magnetron) على يد المهندسين البريطانيين جون راندال وهاري بوت (John Randall & Harry Boot) وهذا المولد وعلى العكس من المجنيترون العادي قادر على توليد ترددات في منطقة الميكروويف وقادر كذلك على إنتاج قدرات كبيرة جدا تصل لمئات الكيلوطات. لقد كان هذا الاختراع الأساس التي قامت عليه أنظمة الرادار الحديث حيث تتطلب الرادارات ترددات وقدرات بث عالية جدا فالترددات العالية تلزم لتصغير حجم الهوائيات وكذلك لتقليل عرض أشعة الرادار لزيادة دقة تحديد موقع الهدف أما قدرات البث العالية فتلزم لزيادة المدى الذي يمكن للرادار أن يكشف ضمنه الأهداف. ولقد تم خلال الحرب العالمية الثانية (1939-1945م) تطوير الرادارات بشكل كبير جدا بسبب الحاجة الماسة لها وقد تمكن الأمريكان من تصنيع رادار يعمل على تردد ثلاثة جيقاهيرتز باستخدام المجنيترون بينما كانت جميع الرادارات الألمانية تعمل على ترددات دون واحد جيقاهيرتز مما ساعد في انتصار الحلفاء على ألمانيا. وفي عام 1946م تم استخدام الرادار لقياس بعد القمر عن الأرض. وخلال السنوات التي تلت الحرب بدأ باستخدام الرادارات في التطبيقات المدنية المختلفة كمراقبة الملاحة الجوية والبحرية وفي الأرصاد الجوية وفي استكشاف الفضاء ودراسة التضاريس الأرضية. وفي عام 1954م تم إنتاج أول رادار يعمل بنظام دوبلر حيث يمكنه تحديد سرعة الأهداف المتحركة. ومع

ظهور الحواسيب والمتحكمات الدقيقة ومعالجات الإشارات الرقمية طرأت تحسينات كثيرة على أنظمة الرادار من حيث التحكم بالرادار لغرض متابعة الأهداف ومن حيث القدرة على استخلاص معلومات كثيرة من الإشارات المرتدة عن الأهداف.

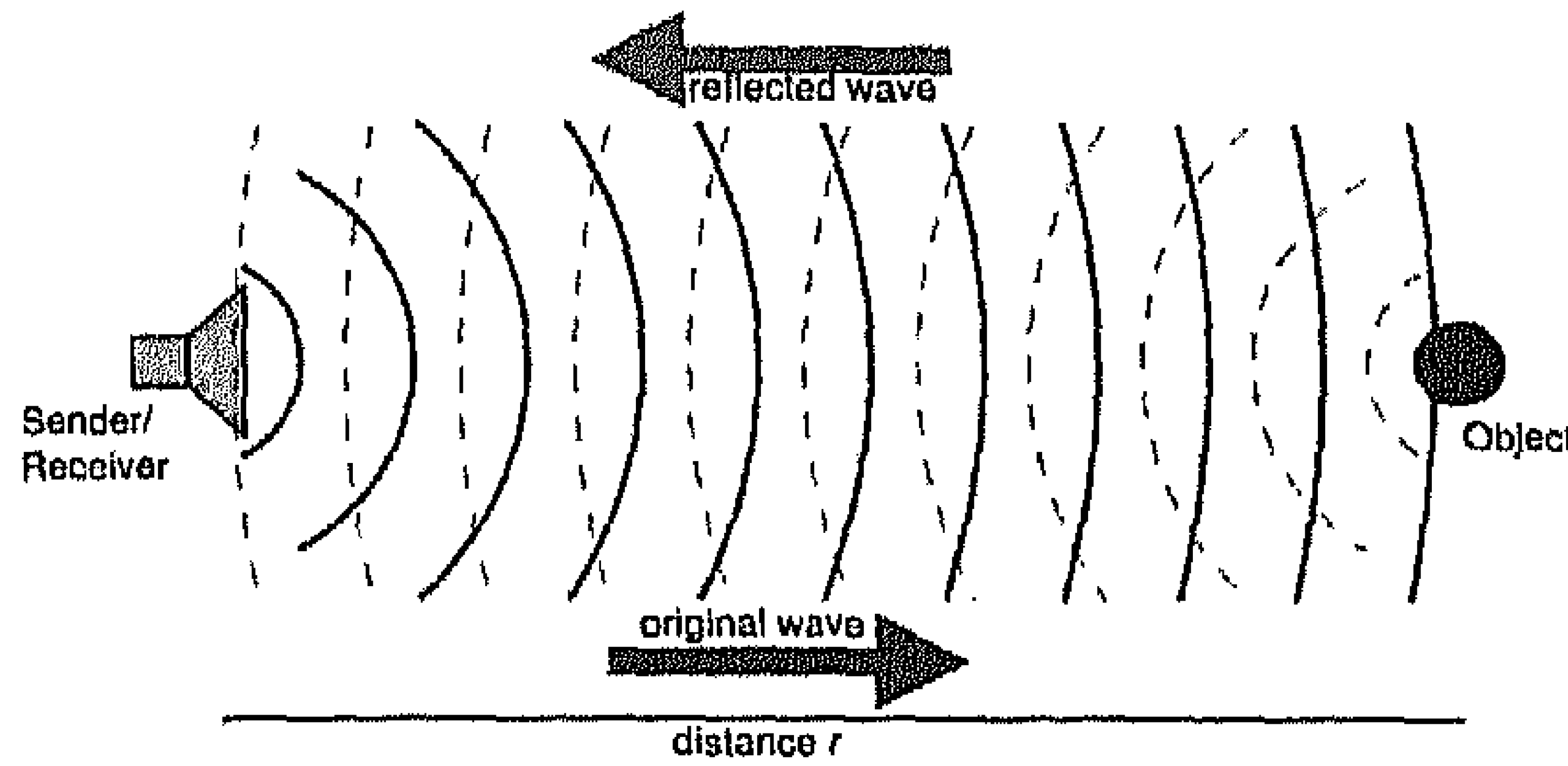
3-9 مبدأ عمل الرادار

إن المبدأ الأساسي الذي يقوم عليه عمل جميع أنواع الرادارات هو في أن الموجات الكهرومغناطيسية تنعكس (reflected) أو تتبعثر (scattered) عند انتقالها من وسط إلى وسط آخر يختلفان في بعض خصائصهما الكهربائية والمغناطيسية والتي عادة ما تتحدد بثوابت ثلاث وهي العزل الكهربائي (permittivity) والموصلية (conductivity) والنفاذية المغناطيسية (permeability). وبما أن الموجات الكهرومغناطيسية المنطلقة من هوائيات الرادارات تنتشر في الهواء فإنها بالتالي ستنعكس بدرجات متفاوتة عن جميع الأجسام التي تعترض طريقها وذلك لأن خصائصها الكهربائية والمغناطيسية تختلف عن تلك التي للهواء والتي هي أقرب ما تكون لخصائص الفراغ. وإذا ما تمكن الرادار باستخدام هوائيات الاستقبال من التقاط الموجات المنعكسة عن هذه الأجسام أو ما نسميها الأهداف فإنه يقوم بمعالجتها ليستخلص معلومات بالغة الأهمية عن هذه الأهداف. فالمعلومات المستخلصة في حالة الرادار المثالي هي أولا التأكد من وجود أو عدم وجود الهدف وثانيا تحديد مكان الهدف في الفضاء المحيط بالرادار والذي يعطى بأبعاد ثلاثة وهي الزاوية الأفقية (azimuth angle) والزاوية الرأسية (elevation angle) والبعد (distance) عن الرادار وثالثا تحديد اتجاه سير (direction) وسرعة (speed) الهدف إذا كان متحركا ورابعا طبيعة ونوع الهدف.

إن شدة الموجة المنعكسة عن الأجسام تعتمد على عوامل كثيرة أولها طبيعة المادة التي يتكون منها سطح الجسم فالمعادن بمختلف أنواعها لها معامل انعكاس قد يصل إلى الواحد وذلك لارتفاع موصليتها ولذلك فإنه من السهل على الرادار كشف الطائرات والسفن والمركبات لأن أجسامها مصنوعة من المعادن كالحديد والألمنيوم. أما شدة الموجة المنعكسة عن المواد العازلة فإنه يعتمد على معاملات انكسارها (refractive index) فكلما زاد معامل الانكسار كلما زادت درجة الانعكاس ولكنه لا يصل إلى مستوى المواد المعدنية. وهنالك من المواد المصنعة ما يمكنها امتصاص أشعة الرادار ولا يعكسها كبعض المواد المعدنية ذات المقاومة الكهربائية العالية وبعض المواد المغناطيسية وبعض الأصباغ الداكنة ولهذا فإنه من الصعب على الرادار أن يكشفها وتستخدم مثل هذه المواد لطلي أسطح أجسام الطائرات والصواريخ الحربية والعربات العسكرية. أما العامل الثاني فهو شكل سطح جسم الهدف فالأسطح المستوية والمنتظمة تعكس الموجات أكثر من الأسطح غير المستوية أو المتعرجة ولكن الأسطح المستوية ذات فائدة للرادار فقط إذا كانت متعامدة على اتجاه الموجة القادمة من الرادار أما إذا كانت مائلة ولو بزاوية صغيرة عن الاتجاه العمودي فإن الموجة المنعكسة لن تصل إلى الرادار أبدا وبالتالي لن يتمكن من اكتشاف الهدف . ولقد استفاد صانعي الطائرات الحربية من هذه الخاصية في تصنيع طائرات يصعب على الرادار كشفها وذلك من خلال تصنيع السطح الخارجي من عدد كبير من الأسطح المستوية الصغيرة تميل عن بعضها البعض بزوايا صغيرة كما في الطائرة الحربية الأمريكية المسماة بالشبح. أما العامل الثالث فهو طول الموجة التي يعمل عليها الرادار فإذا كان طول الموجة أكبر من أبعاد جسم الهدف فإن الموجة لن تنعكس عن الهدف بل ستحيد عنه وتكمل مسارها في نفس الاتجاه وذلك بسبب ظاهرة الحيود (Diffraction) المعروفة. ولهذا السبب فإن معظم أنواع

الرادارات تستخدم موجات بالغة القصر أي عالية التردد تقع في نطاق الأمواج الدقيقة (Microwaves) الذي يمتد من واحد جيقاهيرتز إلى مائة جيقاهيرتز.

يعمل الرادار من خلال قيام جهاز الإرسال بإطلاق موجة كهرومغناطيسية من خلال الهوائي بتردد محدد باتجاه ما في الفضاء ثم يقوم جهاز الاستقبال بالتنصت على الموجات القادمة من ذلك الاتجاه فقط فإن استقبل موجة بنفس التردد أو قريبا منه فإن هذا يعني وجود جسم ما قد اعترض مسار الموجة المرسلة في ذلك الاتجاه وقام بعكسها باتجاه الرادار.



إن الدقة في تحديد اتجاه الهدف يعتمد اعتمادا كبيرا على عرض الشعاع المنبعث من الرادار فكلما قل عرض الشعاع كلما زادت دقة تحديد الاتجاه ولهذا السبب فإن الرادارات تستخدم هوائيات عالية التوجيه (high directivity) للحصول على أشعة ذات عرض ضيق جدا أقرب ما تكون لشعاع الليزر. ولكي يتمكن الرادار من كشف الأهداف في جميع الاتجاهات فإن عليه القيام بمسح (scan) جميع الفضاء المحيط بالرادار بشعاع ضيق جدا وهذه مهمة ليست بالسهلة حيث يتطلب من الرادار تحريك الهوائي في جميع الاتجاهات ضمن فترة زمنية محددة ثم يقوم بتكرار هذه العملية بشكل دوري ومتواصل. ويتم تحديد الزاوية الأفقية والزاوية الرأسية لاتجاه الهدف من اتجاه الهوائي في اللحظة التي يتم بها إرسال أو استلام الموجة المنعكسة علما بأن الفترة الزمنية فيما بين إرسال الموجة واستقبالها لا يتجاوز الملي ثانية بسبب أن الموجات تنتشر بسرعة الضوء. أما بعد الهدف عن الرادار وكذلك سرعته فإنه يتم تحديدهما بطرق مختلفة وذلك حسب نوع الرادار والذي سنشرحها بعد قليل. إن مثل هذا الرادار الذي يحدد موقع الهدف بأبعاده الثلاثة وهي الزاوية الأفقية والزاوية الرأسية والبعد يسمى رادار ثلاثي الأبعاد (3D radar) وهو كما ذكرنا سابقا ليس من السهل تنفيذه. ولهذا السبب فإن معظم الرادارات العملية هي رادارات ثنائية الأبعاد (2D radar) تحدد البعد والزاوية الأفقية ولا تحدد الزاوية الرأسية و يلزم في هذا الحال أن يكون عرض الشعاع في الاتجاه الرأسي واسعا بينما يكون ضيقا جدا في الاتجاه الأفقي لكي يزيد من دقة تحديد الاتجاه الأفقي. وفي الرادارات ثنائية البعد يتم تدوير الهوائي ميكانيكيا حول المحور الرأسي لكي يغطي جميع الزوايا الأفقية التي تمتد من صفر إلى 360 درجة ويجب أن لا تزيد سرعة دوران الهوائي عن سرعة معينة وذلك لكي يتمكن من التقاط الموجات المرتدة من الأهداف البعيدة وتعتمد سرعة تدوير الهوائي على نوع الاستخدام حيث تتراوح بين عدة دورات في الدقيقة لرادارات الطقس وعدة عشرات في التطبيقات العسكرية.

معادلة الرادار (Radar Equation)

تستخدم معادلة الرادار لتصميم مختلف أنواع الرادارات للتطبيقات المختلفة فمن هذه المعادلة يمكن حساب أقصى بعد يمكن أن يغطيه الرادار أو قدرة البث اللازمة لتغطية منطقة مراقبة معينة. وتتحدد قدرة الإشارة المرتدة إلى الرادار من المعادلة المشهورة التالية:

$$P_r = \frac{P_t G_t A_r \sigma F^4}{(4\pi)^2 R^4}$$

حيث أن P_t هي قدرة الإشارة المرسلة من الرادار و G_t هو كسب هوائي الإرسال و A_r هي المساحة الفعلية لهوائي الاستقبال و σ هو مساحة المقطع العرضي الفعلي للهدف كما يراه الرادار و F هو عامل الانتشار الذي يأخذ في الاعتبار طبيعة التضاريس والجو الذي يعمل فيه الرادار وأخيرا R هي المسافة بين الرادار والهدف. ومن الواضح من هذه المعادلة أن قدرة الإشارة المرتدة تتناسب عكسيا مع المسافة مرفوعة للأس أربعة بينما تتناسب هذه القدرة في أنظمة الاتصالات عكسيا مع مربع المسافة مما يعني صعوبة بالغة في تصميم أنظمة الرادار وعلى الأخص بعيدة المدى. فعلى سبيل المثال فإن قدرة البث اللازمة لرادار يغطي مائة كيلومتر تزيد بعشرة ملايين مرة عن تلك التي لنظام الاتصالات إذا ما افترضنا نفس الحساسية للمستقبل ونفس الكسب لهوائي الإرسال والاستقبال.

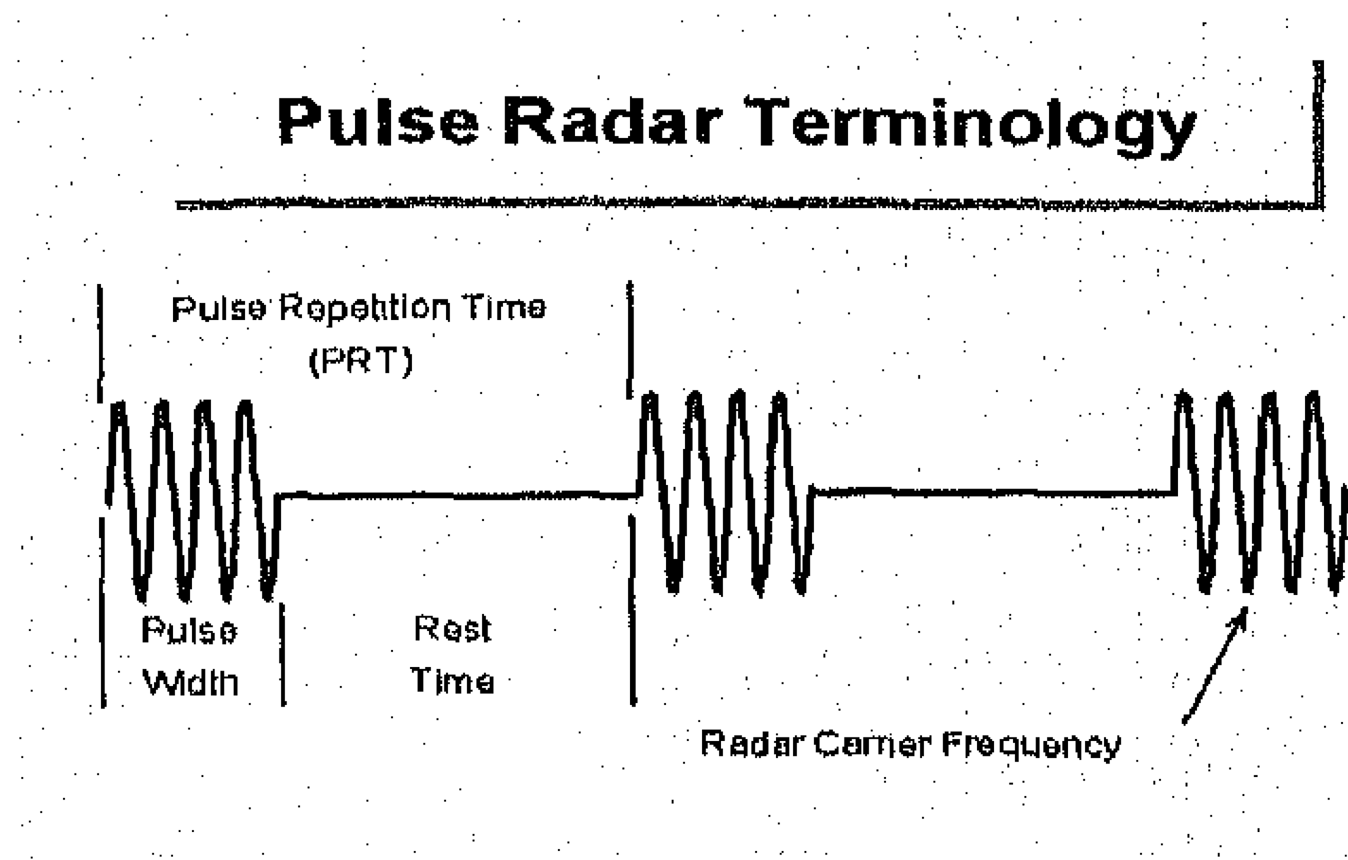
ويمكن تقليل قدرة البث المفرطة العلو في أنظمة الرادار بعيدة المدى من خلال استخدام طرق مختلفة أهمها استخدام هوائيات كبيرة الحجم حيث أن قدرة الإشارة المستلمة تتناسب طرديا مع أبعاد هوائي الإرسال والاستقبال أو استخدام ترددات عالية جدا حيث أن كسب الهوائي يتناسب طرديا مع مربع التردد المستخدم ولذلك نجد أن معظم الرادارات تستخدم ترددات تقع في نطاق الموجات الدقيقة والمليمترية أي الترددات من واحد إلى مائة جيقاهيرتز. ولكن من عيوب الترددات التي تقع في هذا النطاق أن الغيوم والأمطار والرمال تمتص جزء كبير من طاقتها ويزداد الامتصاص كلما زاد التردد ولذلك فإن بعض التطبيقات تلزم استخدام ترددات أقل من واحد جيقاهيرتز كما في الرادارات المستخدمة في الطائرات والسفن. ومن الواضح أيضا من المعادلة أنه كلما زادت مساحة مقطع الهدف كلما زادت قدرة الإشارة المستقبلة وكلما سهل اكتشافه من قبل الرادار وليس من الضروري أن يتناسب المقطع الفعلي مع حجم الهدف الحقيقي حيث أن شكل سطح الهدف ونوع مادة سطحه مع عوامل أخرى هي التي تحدد مساحة المقطع الفعلي ولهذا فإنه بالإمكان تصنيع طائرات كبيرة الحجم ولكن بمقاطع فعلية صغيرة جدا بحيث يصعب على الرادار اكتشافها. إن الذي يحدد قدرة الرادار على اكتشاف الأهداف هو قيمة قدرة الإشارة المستقبلة بالمقارنة مع قدرة الإشارات غير المرغوب فيها التي تدخل معها إلى المستقبل والتي من أهمها الضجيج (noise) الذي تولده العناصر الإلكترونية في المستقبل وكذلك الركام (clutter) وهو عبارة عن الموجات التي ترتد عن الأجسام الثابتة المحيطة بالهدف كالجبال والغيوم وما شابه ذلك.

9-4 أنواع الرادار

الرادار النبضي (Pulsed Radar)

يعمل الرادار النبضي من خلال إرسال نبضات قصيرة جدا من الموجات الكهرومغناطيسية باتجاه الهدف وبمعدل يتم تحديده بناءا على البعد الأقصى الذي يمكن للرادار أن يقيسه. ويتم تحديد بعد الهدف في الرادار النبضي من خلال قياس الفترة الزمنية التي استغرقتها النبضة من وقت إطلاقها إلى رجوعها للرادار ومن ثم يتم حساب بعد الهدف من خلال ضرب سرعة انتشار الموجات الكهرومغناطيسية في الفضاء والبالغة

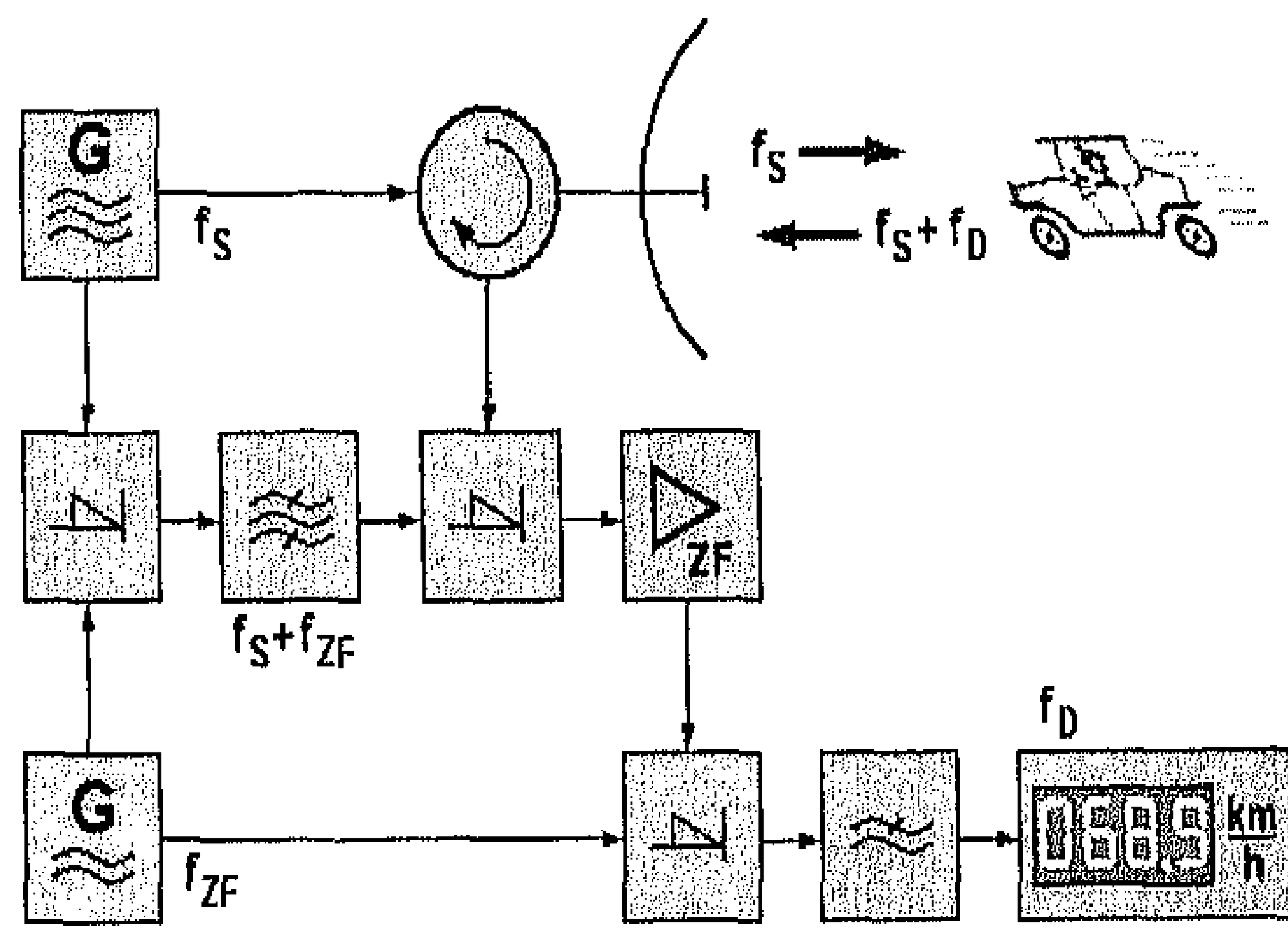
ثلاثمائة ألف كيلومتر في الثانية بنصف قيمة الفترة الزمنية المقاسة. ولكي يتمكن الرادار من تحديد بعد الهدف بدون أي التباس (ambiguity) يجب أن تصل النبضة المرتدة قبل إطلاق النبضة التالية وإلا فإن وصولها بعدها سيجعل الأمر ملتبسا على المستقبل لا يدري إن كانت النبضة المرتدة ناتجة عن النبضة المرسلة حديثا أم عن النبضات التي سبقتها. وعلى هذا فإن الرادار المصمم لقياس مدى قد يصل إلى مائة كيلومتر



وبدون أي التباس يجب أن لا يزيد معدل النبضات المرسلة عن ألف وخمسمائة نبضة في الثانية. أما أقل بعد يمكن أن يقيسه الرادار فيتحدد من عرض النبضة المرسلة فالرادار النبضي لا يمكنه قياس النبضات التي ترتد في زمن يقل عن عرض النبضة. ولقياس بعد الأهداف القريبة يجب أن يقل عرض النبضة عن قيمة محددة يتم احتسابها من قيمة أقل بعد فعلى سبيل المثال فإن عرض النبضة يجب أن لا يزيد عن سبعة أجزاء من مليون جزء من الثانية. إن تقليل عرض النبضة سيؤدي إلى تقليل كمية الطاقة التي تحتويها وبالتالي سيؤدي إلى تقليل البعد الأقصى للهدف الذي يمكن للرادار أن يكتشفه ولذلك فإنه من الصعب استخدام الرادار النبضي في نفس الوقت لقياس بعد الأهداف البعيدة والقريبة ولذلك يوجد رادارات نبضية بعيدة المدى لا يمكنها قياس بعد الأهداف القريبة وكذلك العكس.

رادار دوبلر (Doppler Radar)

يستخدام رادار دوبلر لقياس سرعة الأهداف المتحركة باستخدام ما يسمى بتأثير دوبلر (Doppler effect) والذي مفاده أن تردد الموجة الكهرومغناطيسية المرتدة عن الهدف المتحرك قد يزيد أو ينقص عن تردد الموجة المرسلة بمقدار يتناسب طرديا مع مركبة سرعة الهدف باتجاه الرادار ففي حالة الزيادة فإن الهدف يقترب من الرادار وفي حالة النقصان فإنه يبتعد عنه. ومن الواضح أن سرعة الهدف لا يمكن تحديدها بشكل مطلق إلا في حالة واحدة وهي إذا كان الهدف يتحرك بشكل مباشر نحو الهدف أما إذا كان يتحرك بزاوية عامودية أو مائلة على الخط الواصل بين الهدف وموقع الرادار فإنه من غير الممكن تحديد السرعة المطلقة. ويمكن حساب سرعة الهدف المطلقة بشكل غير مباشر إذا ما تمكنت



المعالجات الموجودة في الرادار من تحديد اتجاه سير الهدف والسرعة الشعاعية (radial velocity) التي تم قياسها من خلال رادار دوبلر. ويقوم جهاز موجود في مستقبل الرادار بمقارنة الترددين وإيجاد الفرق بينهما ومن ثم يتم احتساب السرعة الشعاعية بضرب فرق التردد بثابت معين يتم تحديده حسب الوحدات المستخدمة

لإظهار السرعة كأن تكون كيلومتر في الساعة. ولا بد من التنويه أن حساب السرعة يكون صحيحا إذا كان الرادار ثابتا أما إذا كان الرادار من النوع المحمول فإن السرعة التي يقيسها للهدف هي السرعة الشعاعية النسبية وهي حاصل جمع السرعتين الشعاعيتين إذا كانا يقتربان من بعضهما وحاصل الطرح في حالة التباعد.

الرادار ذو الموجة المستمرة (Continuous Wave radar)

يعمل الرادار ذو الموجة المستمرة من خلال إرسال موجة كهرومغناطيسية جيبية عالية التردد بشكل مستمر وليس على شكل نبضات كما في الرادار النبضي. ويوجد نوعان من هذا الرادار ففي النوع الأول يكون تردد الموجة المرسلة ثابتا ولا يمكن في مثل هذا الحال قياس بعد الهدف سواء أكان متحركا أم ثابتا ولكن يمكن استخدام هذا الرادار لقياس سرعة الأهداف المتحركة باستخدام تأثير دوبلر. ويستخدم هذا النوع في التطبيقات التي تهتم بسرعة الهدف فقط كما في الرادارات المستخدمة من قبل الشرطة لقياس سرعات المركبات على الطرق ولكي يتمكن الشرطي من قياس السرعة بشكل دقيق عليه أن يوجه الرادار بنفس اتجاه سير المركبة ,وإلا ستكون السرعة المقاسة أقل من السرعة الحقيقية. ولقياس بعد الهدف باستخدام الرادار ذي الموجة المستمرة يتم تعديل تردد الموجة الجيبية بإشارة ذات تردد منخفض لها شكل سن المنشار (waveSawtooth) بحيث يزداد تردد الموجة الجيبية خطيا من قيمة دنيا عند بداية الدورة إلى قيمة عليا عند نهايتها ويسمى هذا النوع رادار الموجة المتصلة بتعديل التردد (frequency-modulated continuous wave radar). وعندما يقوم المستقبل بمقارنة تردد الموجة المرتدة مع تردد الموجة المرسلة عند لحظة زمنية معينة نجد أن هنالك فرقا بينهما نتيجة للتأخير الزمن في الموجة المرتدة ومن السهل إثبات أن بعد الهدف عن الرادار يتناسب مع الفرق في التردد. ويستخدم هذا النوع من الرادار لقياس بعد الأهداف الثابتة حيث أن الأهداف المتحركة تعمل أيضا على تغيير التردد مما يجعل الأمر ملتبسا على المستقبل فلا يستطيع التمييز فيما إذا كانت الإزاحة في التردد ناتجة عن التأخير الزمني أو عن تأثير دوبلر. ومن الواضح أيضا أن هذا النوع من الرادارات لا يمكنه قياس سرعة الهدف وذلك لنفس السبب. ولذلك فإن رادار الموجة المتصلة بتعديل التردد يستخدم بكثرة في الطائرات لقياس ارتفاعها عن الأرض والذي يسمى راديو مقياس الارتفاع (radio altimeters).

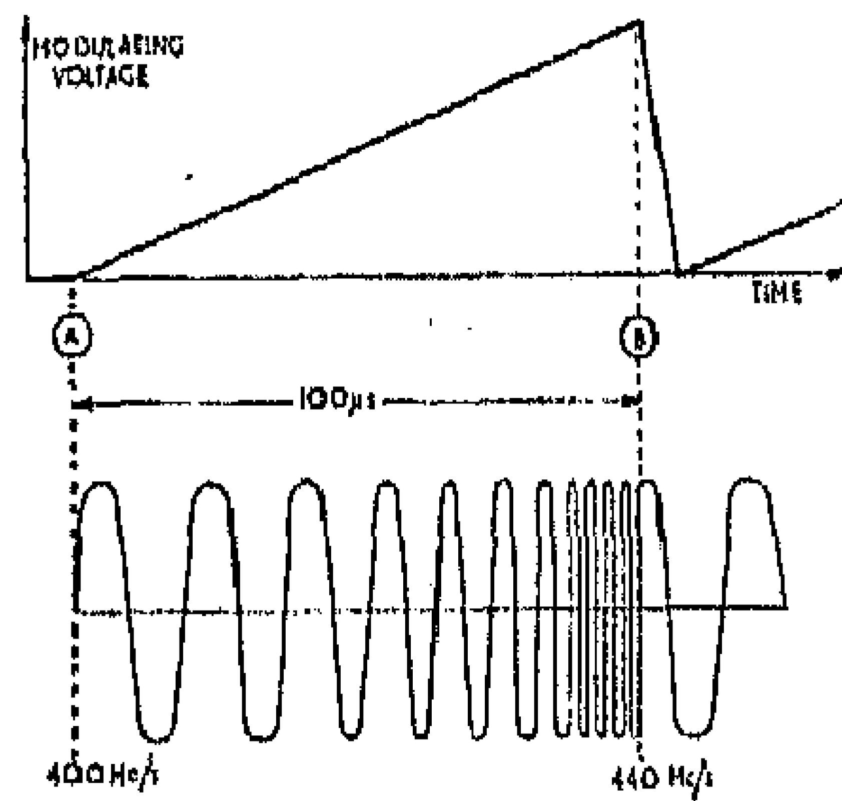
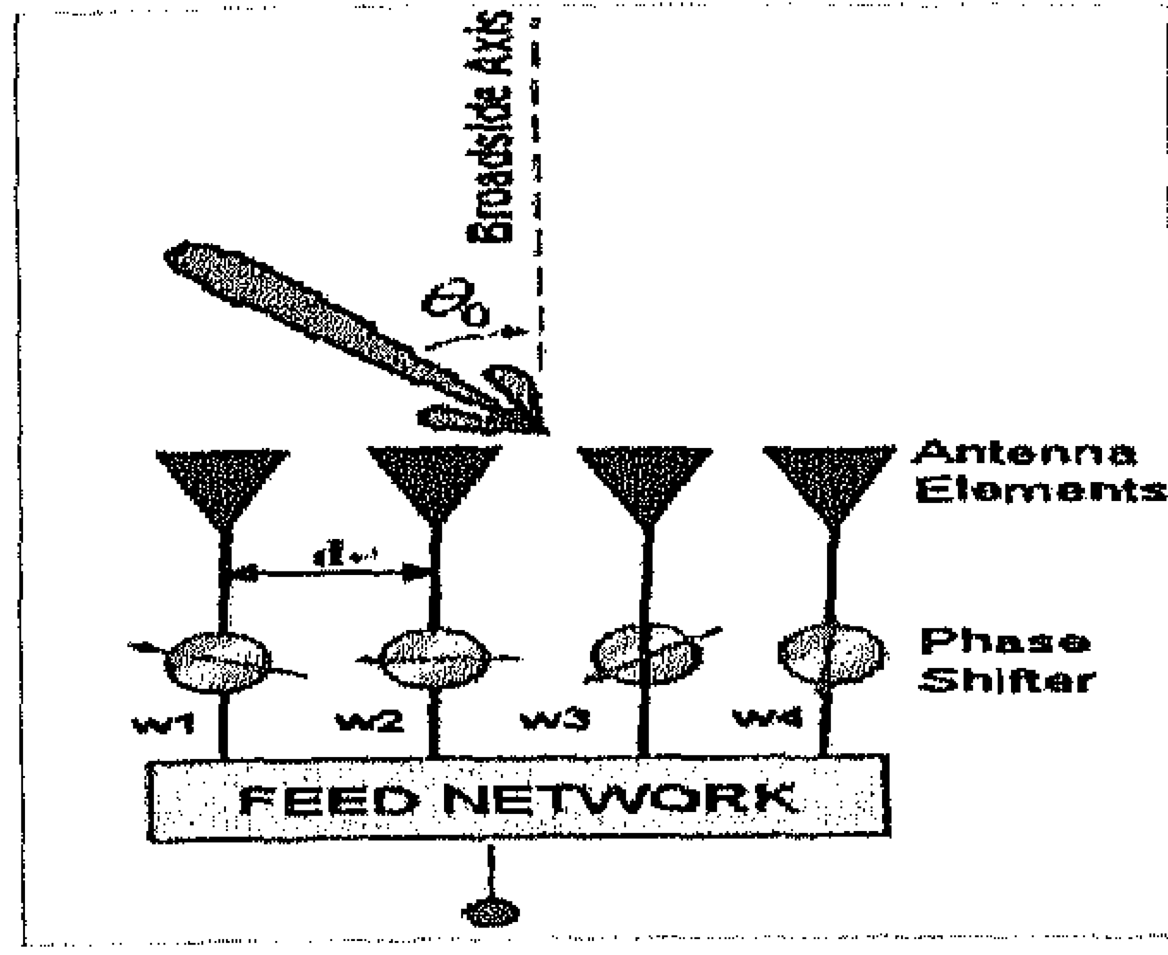


FIG 2. FREQUENCY MODULATION WITH A SAWTOOTH MODULATING SIGNAL

رادار المصفوفة الطورية (Phased Array Radar)

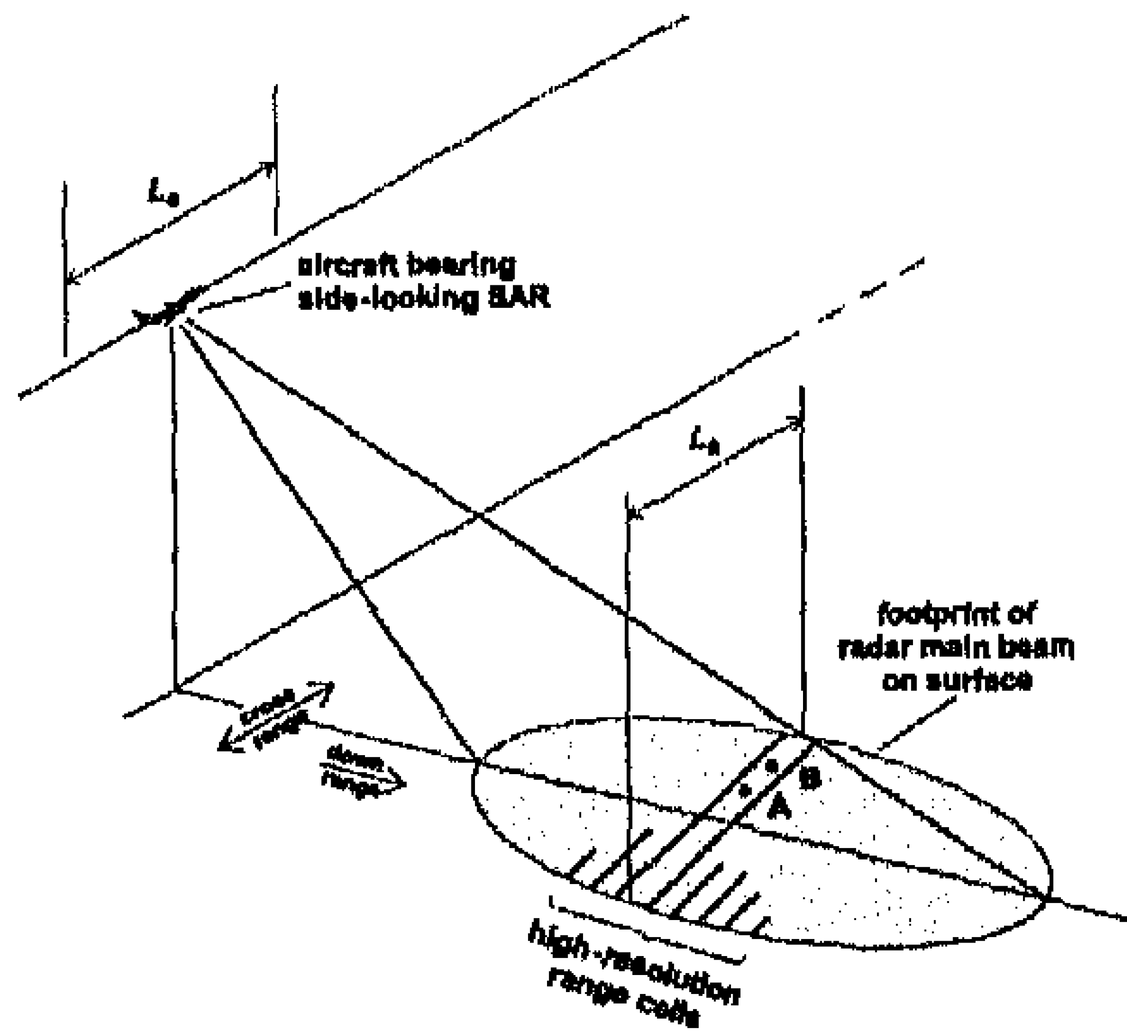
لا يختلف رادار المصفوفة الطورية عن الرادار التقليدي سوى في نوع الهوائي المستخدم والطريقة التي يتم بها مسح الفضاء بشعاع الهوائي. ففي الرادار التقليدي تستخدم الهوائيات الصحنية والتي يتم تدويرها بسرعة معينة لكي تتم عملية المسح بينما يستخدم رادار المصفوفة الطورية هوائيات ثابتة لا تتحرك وتتم عملية مسح الفضاء المحيط بتوجيه الشعاع وتحريكه بطريقة إلكترونية. ويكمن سر هذا الرادار في هوائي

المصفوفة الطورية (phased array antenna) وهو عبارة عن مجموعة من الهوائيات البسيطة (dipole antennas) يتم تغذيتها بتيارات يمكن التحكم بشدتها وبأطوارها (phases) بطريقة إلكترونية ومن خلال اختيار شدة التيارات وأطوارها للهوائيات البسيطة يمكن الحصول على شعاع أو أكثر وبأي اتجاه للهوائي الكلي. وتتميز هوائيات المصفوفة الطورية كذلك بقدرتها على تشكيل أكثر من شعاع ويمكن تحريك كل شعاع بشكل مستقل عن بقية الأشعة وهذا يناسب رادارات التتبع (tracking radars). لقد ظهرت فكرة استخدام الرادارات ذات المصفوفة الطورية خاصة في الطائرات الحربية أثناء الحرب العالمية الثانية ولكن لم تنجح محاولات بنائها إلا في الستينات بعد تطور تكنولوجيا الإلكترونيات. لقد أصبح هذا النوع من الرادارات هو المفضل في كثير من التطبيقات بسبب عدم الحاجة لتحريك الهوائيات ميكانيكيا وأكثر ما تستخدم في الطائرات بمختلف أنواعها وذلك لصعوبة وضع رادارات تقليدية على ظهرها.



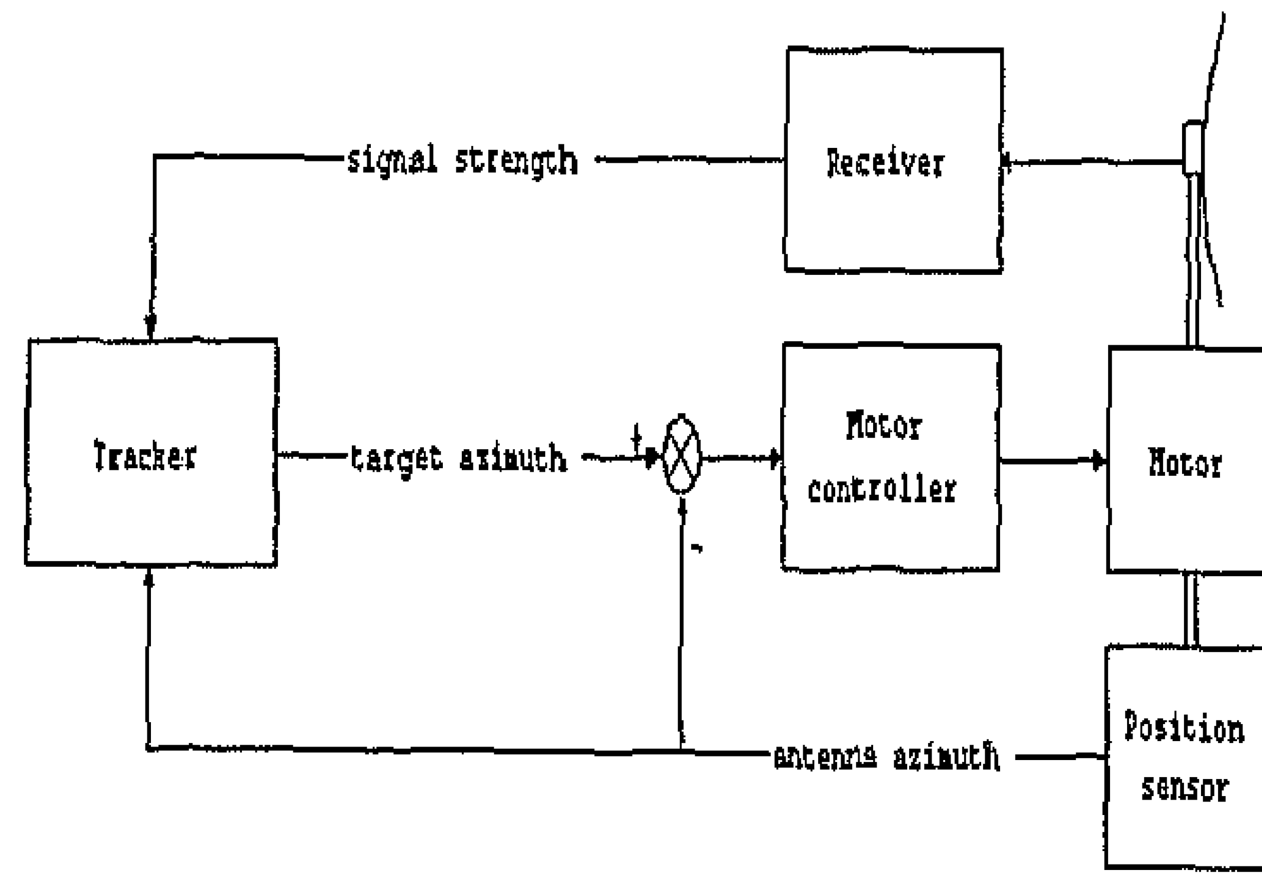
الرادار ذو الفوهة المصطنعة (Synthetic Aperture Radar (SAR))

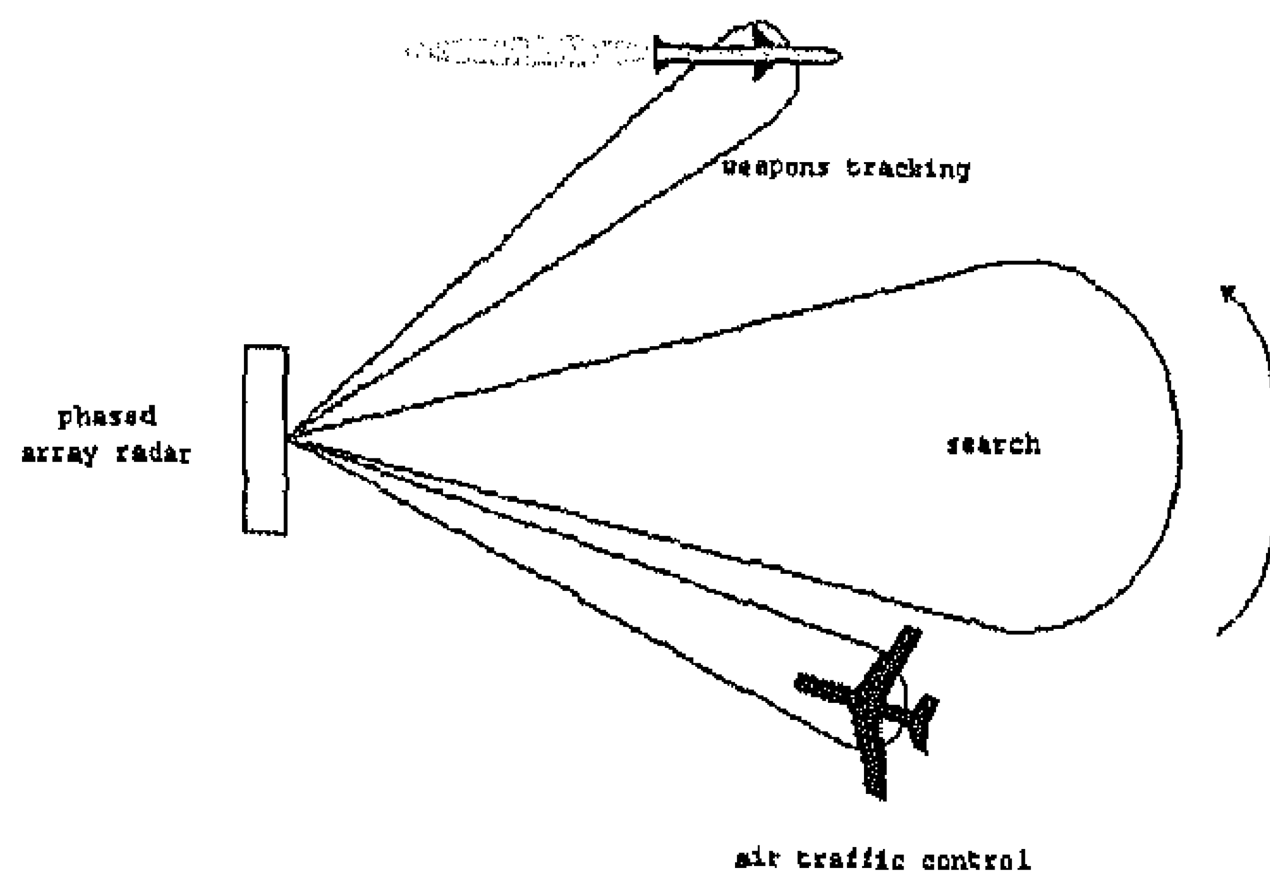
يتطلب تصوير بعض الأهداف بحيث تظهر تفصيلات معالمه هوائيات ذات حجم بالغ الكبر وذلك للحصول على شعاع ضيق جدا يمكنه مسح تفصيلات الهدف. وغالبا ما يصعب بناء مثل هذه الهوائيات الكبيرة أو يصعب حملها بالطائرات إذا كان التصوير من الجو. وقد تم التغلب على هذه المشكلة من خلال استخدام مبدأ بسيط وهو أن عددا من الهوائيات الصغيرة الحجم المتباعدة مكانيا والموجهة نحو الهدف يمكن أن تقوم مقام هوائي كبير الحجم شريطة القيام بمعالجة معقدة للإشارات التي تلتقطها هذه الهوائيات من زوايا مختلفة وذلك باستخدام الحواسيب. وقد تم استخدام ما يشبه هذه الطريقة في تصوير المجرات حيث يتم توزيع الهوائيات على مناطق جغرافية متباعدة ويتم معالجة الصور الفردية الملتقطة غير الواضحة للحصول على صورة عالية الوضوح. وكذلك يتطلب تصوير أهداف موجودة على سطح الأرض بدقة واضحة من الجو باستخدام رادارات محمولة بالطائرات هوائيات كبيرة الحجم يصعب في الغالب وضعها على هذه الطائرات. وبدلا من استخدام عدة رادارات موزعة في الجو وهو ما يصعب تحقيقه تقوم طائرة واحدة تحمل رادار بهوائي صغير بالتحرك فوق الهدف وأخذ صور متلاحقة من أماكن مختلفة في الجو وعند معالجة هذه الصور يتم الحصول على صورة رادارية عالية الوضوح. يستخدم هذا النوع من الرادارات في تطبيقات لا حصر لها كالاستشعار عن بعد وفي تصوير الأهداف والمنشئات العسكرية.



رادار التتبع (Tracking Radar)

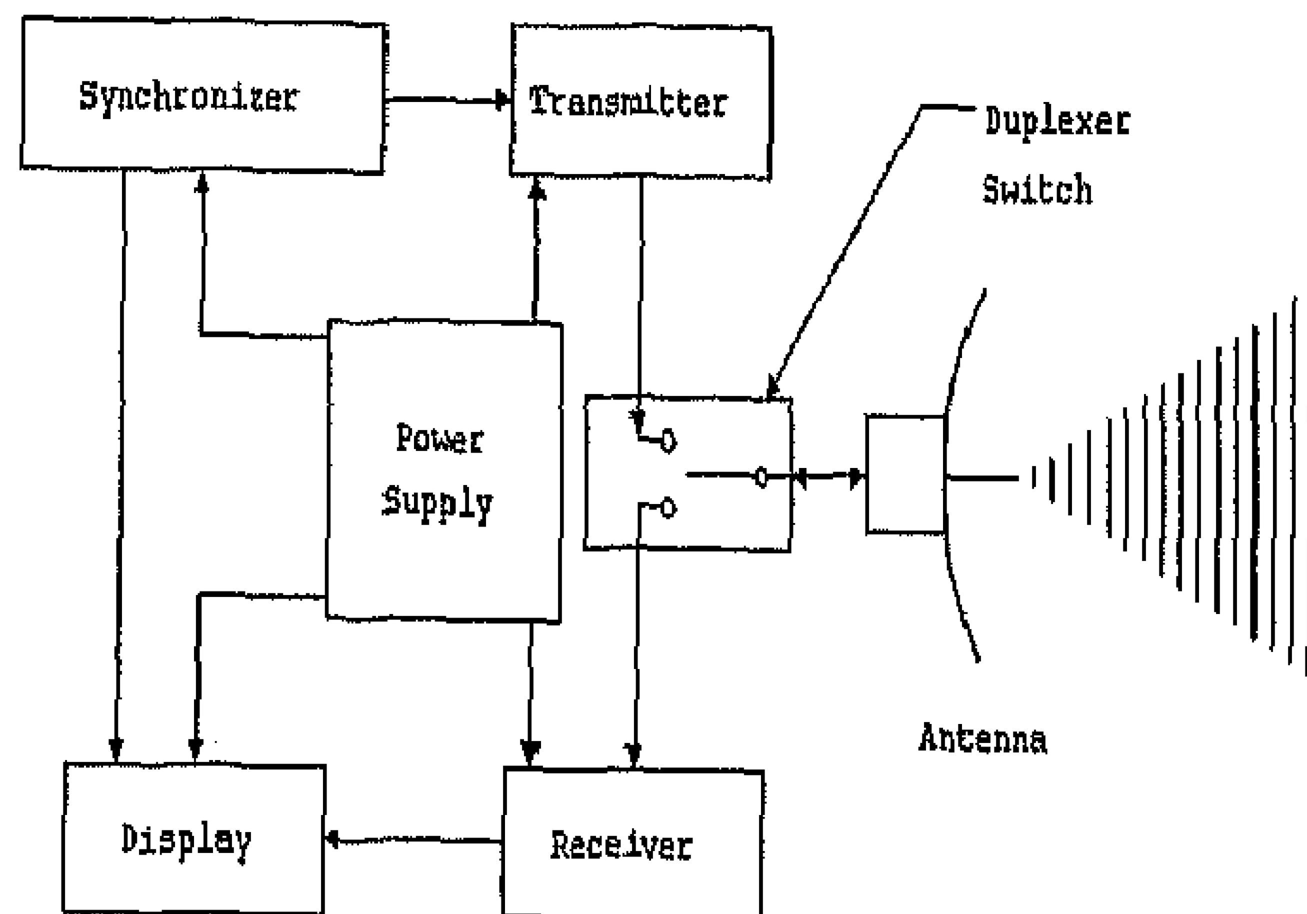
تتطلب بعض التطبيقات أن يقوم الرادار بتتبع الهدف المتحرك بعد أن يتم اكتشافه من قبل نفس الرادار أو رادار آخر حيث يتوقف هوائي الرادار عن الدوران ويتم توجيهه نحو الهدف تماما ويتابع حركته باستمرار. وغالبا ما يتم استخدام نظام تحكم بتغذية راجعة سلبية تتحكم بحركة الهوائي لكي يتمكن من متابعة الهدف بشكل دقيق. وأكثر ما تستخدم مثل هذه الأنظمة في التطبيقات العسكرية حيث يتم ربط نظام التتبع بنظام التحكم بمصادر النيران بحيث يتم توجيهها نحو أهدافها بطريقة آلية وما على الجندي إلا الضغط على الزناد لإطلاق النار في الوقت المناسب أو يتم ذلك بشكل تلقائي. وتستخدم هذه الأنظمة في أنظمة الدفاع الجوي والصواريخ قصيرة المدى وفي الأنظمة المضادة للصواريخ وغيرها. وتستخدم كذلك في أنظمة هبوط الطائرات. إن أحد عيوب هذا النظام أن عملية المسح للأهداف الأخرى توقف بمجرد اكتشاف الرادار لأحد الأهداف والقيام بتتبعه وتحل هذه المشكلة إما بوجود رادارات أخرى أو باستخدام نظام التتبع مع البحث (track-while-scan (TWS)) ولكن يلزم في هذه الحالة وجود حاسوب يقوم بتخزين معلومات عن عدد من الأهداف المتتبعة ويمكنه إرسال إشارات لأنظمة التحكم بالنيران لتوجيهها نحو هذه أهداف. ويمكن أن تحل هذه المشكلة أيضا باستخدام رادارات بهوائيات المصفوفة الطورية (phased array antenna). وتتميز هذه الأنواع من الرادارات بأن عملية المسح تتم بطريقة إلكترونية (electronic scanning) حيث لا يلزم تحريك الهوائي كما في الرادارات العادية. وتتميز كذلك بإمكانية برمجة الهوائي ليشكل أكثر من شعاع يستخدم بعضها للمسح وبعضها لمتابعة الأهداف.



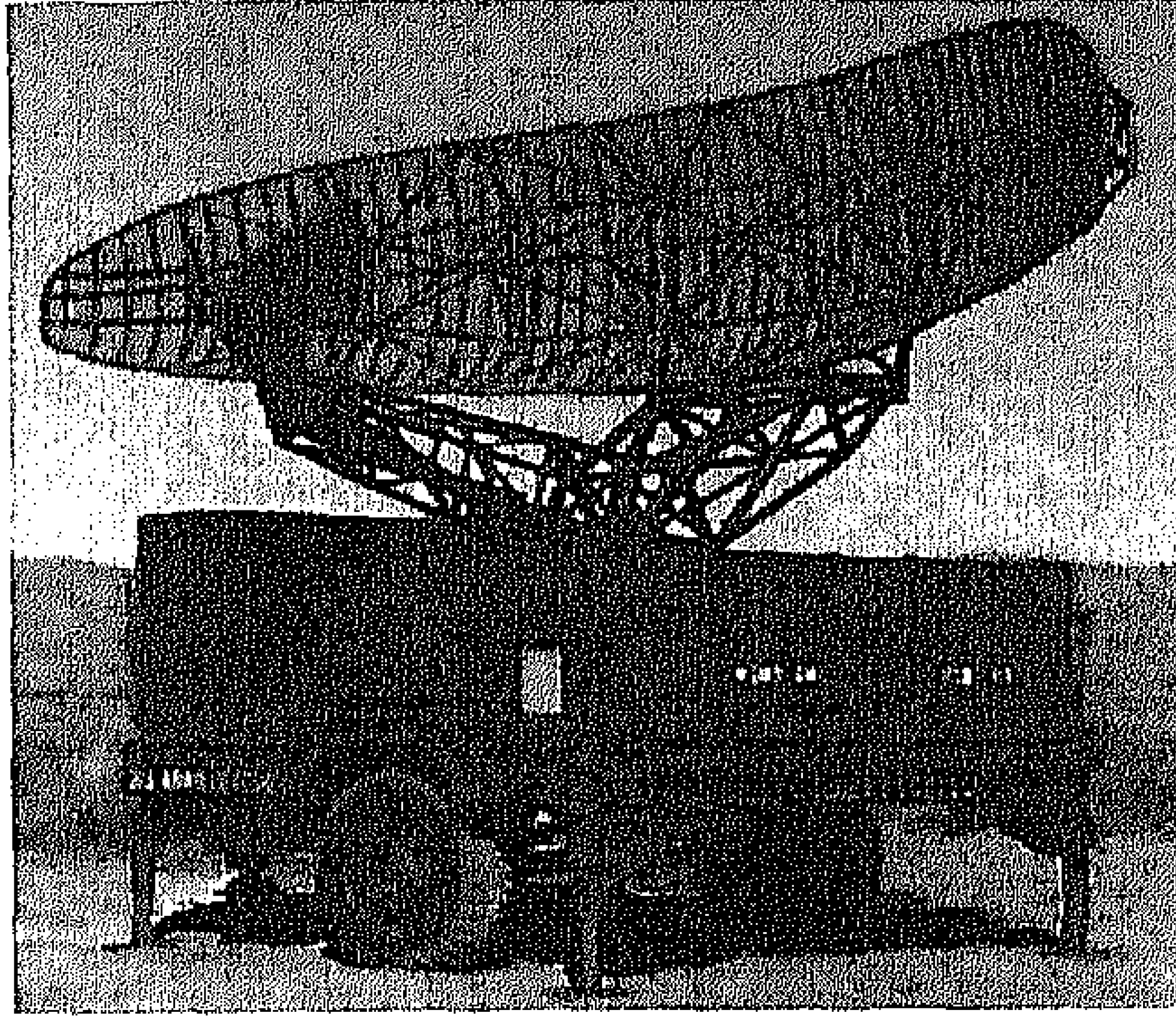


9-5 مكونات الرادار

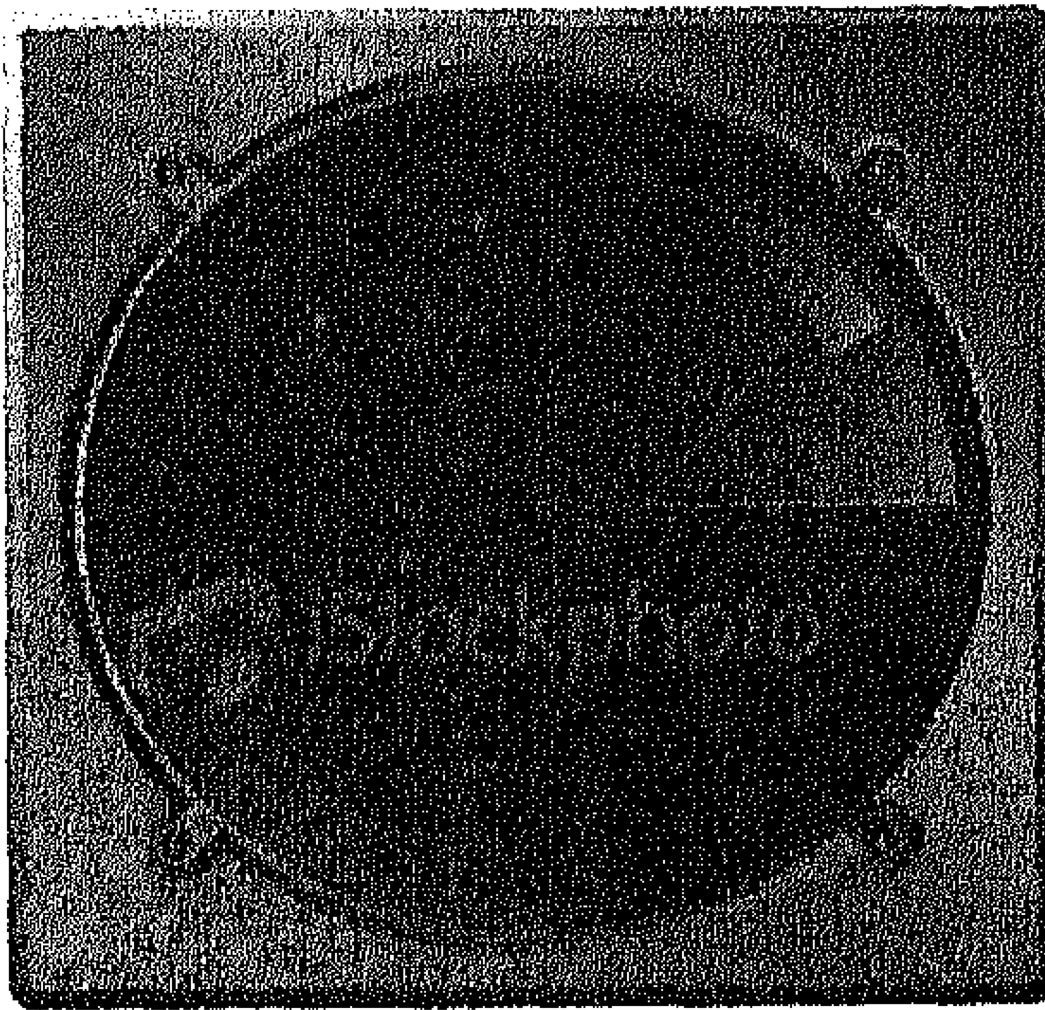
يتكون الرادار بشكل عام من عدة أقسام رئيسية وهي المرسل والمستقبل والهوائيات ومفتاح الإرسال والاستقبال وشاشة العرض ومعالجات الإشارة والموقت أو المزامن (synchronizer). ويتكون المرسل من مذبذب يقوم بتوليد إشارة كهربائية جيبية ذات قدرة منخفضة وبتردد ثابت أو متغير تحدد قيمته حسب نوع الرادار ومن معدل يقوم بتحديد شكل الموجة التي يرسلها الرادار



والتي تكون في الغالب على شكل نبضات متتالية بعرض لا يتجاوز عدة ميكروات من الثانية ومن مضخم يقوم بتكبير الإشارة الكهربائية ذات القدرة المنخفضة التي يولدها المذبذب لينتج إشارة عالية القدرة قد تصل إلى الميجاواط . ويتكون المستقبل من مضخم عالي الحساسية (high sensitive amplifier) يقوم بتكبير الإشارة الضعيفة جدا المرتدة من الهدف والتي قام الهوائي بالتقاطها والتي لا تتجاوز قدرتها جزء من بليون جزء من الواط ومن عدد كبير من المرشحات لتقليل أثر إشارات الضجيج والتداخلات على الإشارة المرتدة ومن معالج الإشارات الذي يقوم بحجب إشارات الصدى(echo signals) المرتدة عن الأهداف الكبيرة والثابتة ومن ثم حساب بعد الهدف وسرعته وإظهار الهدف على شاشة العرض.



أما هوائي الرادار فيتكون النوع الأكثر شيوعا من هوائي بوقي (horn antenna) مثبت في مقدمة هوائي صحني عاكس حيث يشع البوق الموجات الكهرومغناطيسية باتجاه العاكس الذي يقوم بدوره بتركيزها وبثها على شكل شعاع يتم تحديد شكله تبعا لنوع الرادار. وبما أن معظم الرادارات تتطلب أن يكون عرض الشعاع (beamwidth) في المستوى الأفقي ضيق جدا لزيادة دقة تحديد الهدف بينما يكون عرض الشعاع في المستوى الرأسي كبير نسبيا فإن الهوائي العاكس المستخدم ذا طول وتحدب كبيرين في الاتجاه الأفقي وصغيرين في الاتجاه الرأسي. ويقاس عرض الشعاع بمقدار الزاوية التي تنحصر فيها معظم طاقة الشعاع وهي تتناسب عكسيا مع التردد وقطر الهوائي فكلما زاد التردد والقطر كلما قلت الزاوية وزادت دقة تحديد الهدف. وعادة ما تقل زاوية الشعاع بالمستوى الأفقي في معظم الرادارات عن درجة واحدة بينما قد تصل لعشرات الدرجات في المستوى الرأسي. وفي بعض التطبيقات كالأرصاد الجوية وأنظمة تتبع الصواريخ والاستشعار عن بعد يتطلب أن يكون عرض الشعاع ضيق جدا في المستويين وفي هذه الحالة يمكن استخدام هوائيات صحنية دائرية كتلك المستخدمة في أنظمة الاتصالات. ويتم في معظم أنواع الرادار تدوير الهوائي ميكانيكيا حول محور رأسي في جميع الاتجاهات وذلك لمسح (scan) الفضاء المحيط بالرادار بحثا عن الأهداف المنشودة وقد تتراوح سرعة الدوران من عدة دورات في الدقيقة كما في رادارات الأرصاد الجوية وقد تصل لعدة عشرات من الدورات في الدقيقة في الأنظمة المضادة للصواريخ. وفي الرادار النبضي يستخدم في الغالب الهوائي نفسه للإرسال والاستقبال وهذا يتطلب وجود ما يسمى بالمبدل التناوبي (Duplexer) والذي يقوم بربط المرسل بالهوائي عند الإرسال بينما يكون المستقبل معزولا تماما عن المرسل وإلا احترق بسبب القدرة الهائلة للإشارة المرسلة وبعد انتهاء الإرسال يتم ربط الهوائي بالمستقبل لكي يتمكن من استقبال الإشارة الضعيفة جدا المرتدة من الأهداف. وعند استلام الإشارة تقوم دوائر إلكترونية بمعالجة الإشارة المستلمة واستخلاص المعلومات المتعلقة بالهدف



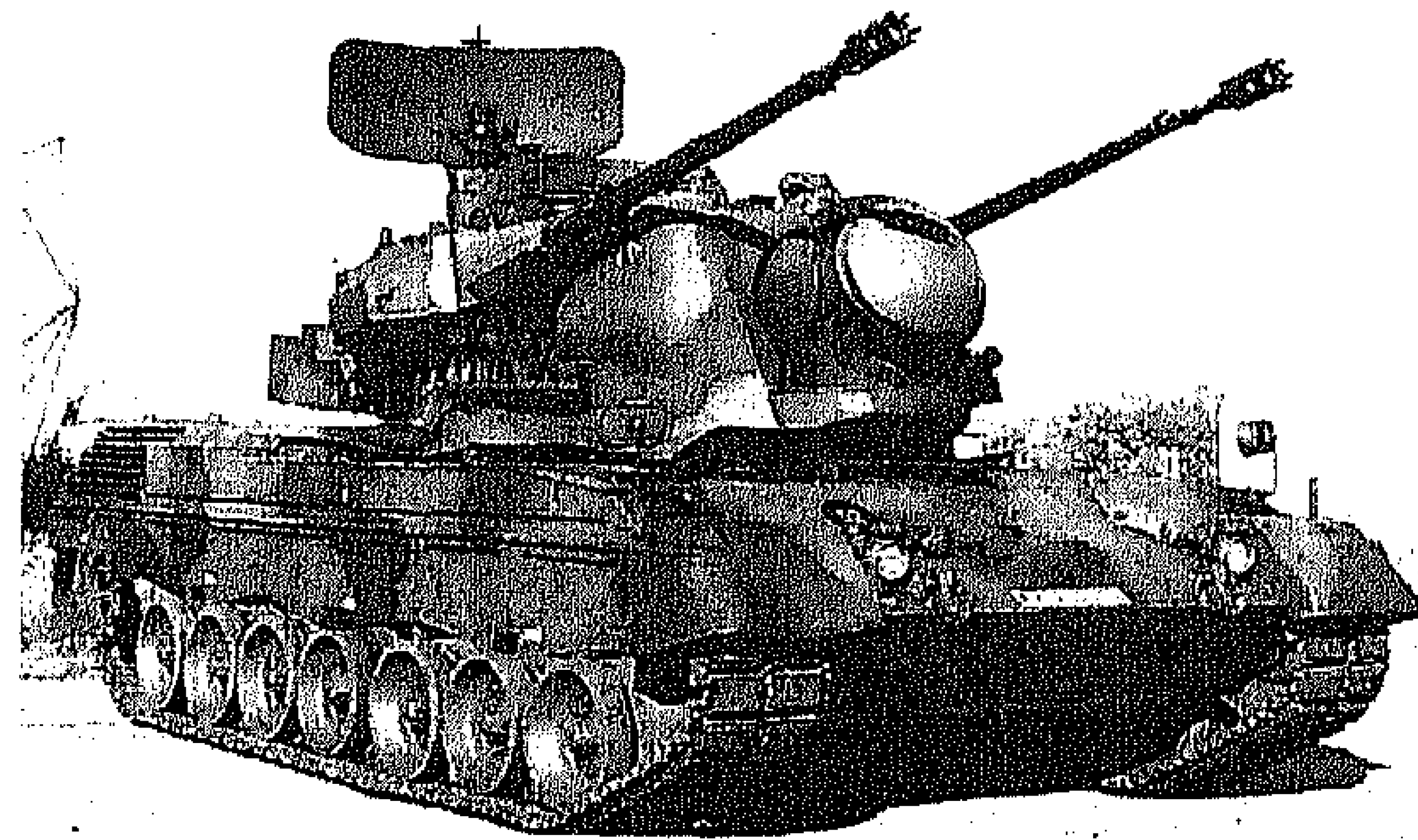
وإظهارها على شاشة العرض وفي الأنواع الحديثة تتم عملية المعالجة بالكامل باستخدام معالجات الإشارات الرقمية ويتم التحكم بكامل عمل الرادار بالحواسيب والمتحكمات الدقيقة (microcontrollers).

وأما شاشة العرض الأكثر استعمالا في الرادارات فهي ما يسمى بمؤشر الموقع التخطيطي (plan position indicator (PPI) وهي عبارة عن أنبوبة أشعة مهبطية كتلك المستخدمة في التلفزيونات ولكن لها شكل دائري وتظهر الأهداف على الشاشة على شكل نقاط مضيئة. ويظهر موقع الرادار في مركز الشاشة ويتم تدريج محيطها بالزاوية الأفقية لتحديد اتجاه الهدف بينما يتم رسم دوائر متعددة حول مركز الشاشة لتبين المسافة بالميل أو بالكيلومتر حيث أن المسافة بين نقطة الهدف ومركز الشاشة هي مقدار بعد الهدف عن الرادار. وفي الرادارات ثنائية الأبعاد تكون ارتفاعات الأهداف البعيدة الظاهرة على الشاشة أعلى منها في الأهداف القريبة وذلك بسبب تحدب الأرض وبسبب أن شعاع الرادار يتم إمالته بزاوية معينة عن سطح الأرض. وفي حالة عدم توفر رادار من نوع دوبلر لقياس سرعة الهدف يمكن تحديد سرعة الهدف بشكل تقريبي من خلال قياس الوقت الذي تستغرقه النقطة لتقطع مسافة معينة على شاشة الرادار. ولقد طرأت تحسينات كثيرة على شاشات الرادار حيث يمكن إظهار كثير من المعلومات عن الهدف بشكل رقمي توضع عند أطراف الشاشة. أما المزامن وهو عبارة عن إشارات توقيتية تضبط سرعة دوران الهوائي وتغذى إلى شاشة العرض لكي يتم إظهار الهدف في المكان المناسب على الشاشة وذلك لتحديد الزاوية الأفقية لموقع الهدف.

9-6 استخدامات الرادار

تستخدم الرادارات في تطبيقات لا حصر لها ولقد أدى استخدامها في كثير من هذه التطبيقات في تحسين آدائها بل إن تعطل الرادارات فيها قد يؤدي لشلل تام في عملها كما في أنظمة الملاحة الجوية والبحرية. وتنحصر مهام الرادارات في التطبيقات المختلفة في أربعة مهام رئيسية وهي المراقبة (surveillance) والتتبع (tracking) والتصوير الراداري (radar imaging) واختراق الأرض لكشف ما تحت سطحها (ground pentration). وفي كل تطبيق توجد أنواع لا حصر لها من الرادارات حيث تتفاوت في أحجامها وفي الترددات المستخدمة وطرق المسح ونوع الهوائيات وطرق معالجة الإشارات وهذا بالتالي ينعكس على أثمانها التي تتراوح بين عدة مئات من الدولارات وملايين الدولارات.

الاستخدامات العسكرية



إن أكثر المجالات استخداما للرادار هي القوات المسلحة بمختلف أنواعها البرية والبحرية والجوية وقد كانت الاحتياجات الحربية هي الدافع الرئيسي في ظهور الرادار وفي تطويره للمستوى الذي هو عليه الآن. يستخدم الرادار في الأنظمة العسكرية في مهام لا حصر لها ويتراوح حجم الرادار فيها من تلك التي تحمل باليد إلى التي تحتل مئات الأمتار المربعة أما

تعقيدها فيتراوح بين تلك التي تقيس بعد الهدف إلى التي ترسم صورا ثلاثية الأبعاد لساحات المعارك. إن أهم مهام الرادار في الأنظمة الحربية هو في كشف وتحديد مواقع الأهداف العسكرية للعدو كالطائرات الحربية والصواريخ بمختلف أنواعها وحاملات الطائرات والغواصات والسفن والزوارق الحربية والدبابات والمدافع والمركبات وحتى الأفراد. أما المهمة الثانية فهي في توجيه الصواريخ وقذائف المدافع والدبابات ضد أهداف العدو بشكل آلي وإصابتها بدقة عالية وذلك من خلال تحديد موقع الهدف أو من خلال إضاءة الهدف بالأمواج الكهرومغناطيسية للصواريخ المحملة برادارات تلتقط الموجة المنعكسة عن الهدف فتقوم بتوجيه الصواريخ نحوه. ويبلغ مدى الرادارات المستخدمة في المدافع المضادة للطائرات عشرة كيلومترات بينما يصل إلى ثلاثين كيلومتر في الصواريخ قصيرة المدى وإلى مائة كيلومتر في الصواريخ متوسط المدى وإلى آلاف الكيلومترات في الصواريخ بعيدة المدى.

رادارات الملاحة الجوية

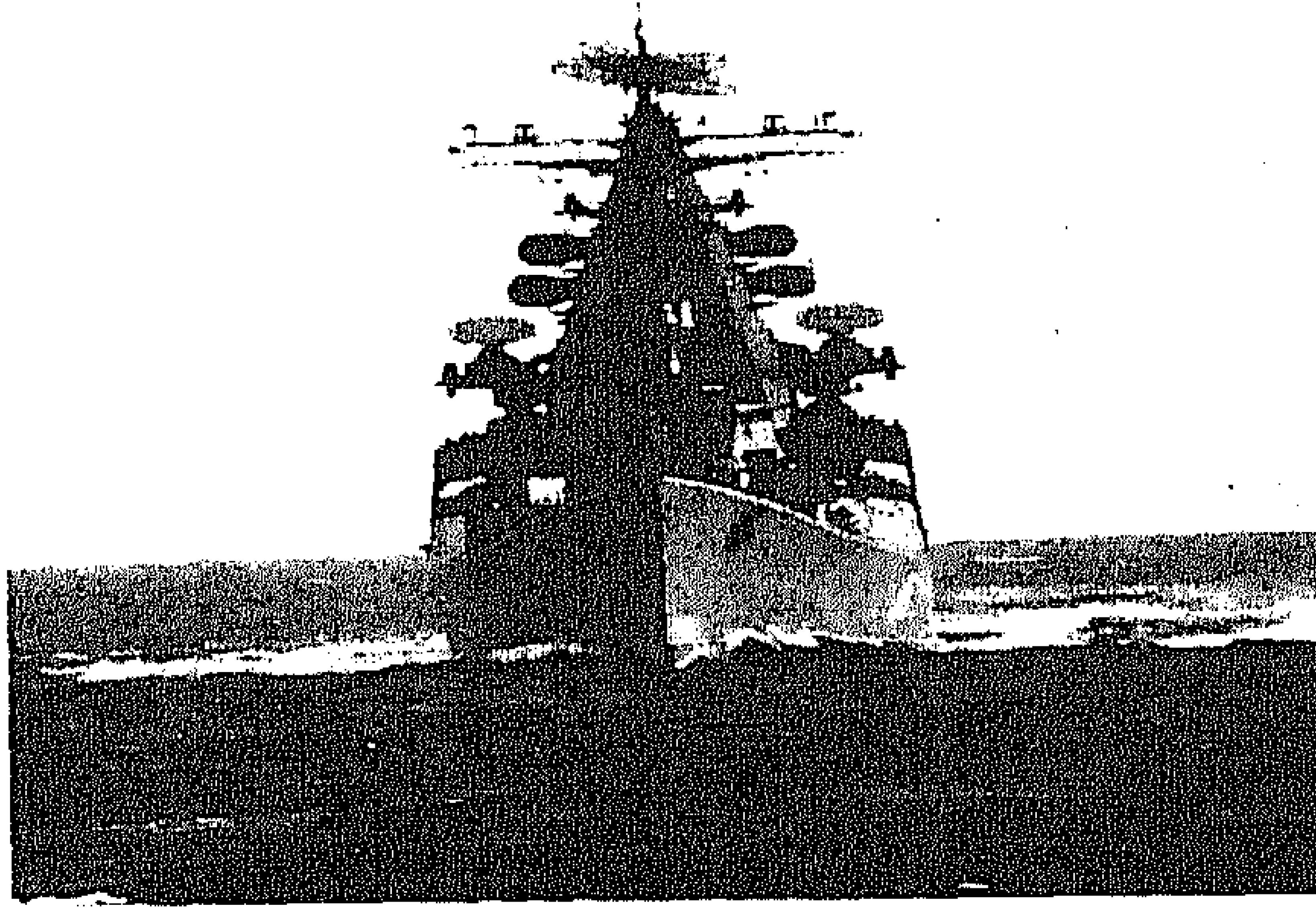
لقد أصبح الرادار أداة مهمة لا غنى عنها في الملاحة الجوية فقد أسهم استخدامه في المطارات وكذلك في الطائرات في استغلال المطارات بكفاءة عالية من خلال زيادة عدد الطائرات القادمة والمغادرة وكذلك الحد من حوادث الطائرات أثناء سيرها في الجو أو عند إقلاعها وهبوطها. ويستخدم في أنظمة التحكم بحركة الطائرات (Air traffic control (ATC) أنواع مختلفة من الرادارات بعضها بعيد المدى وبعضها قصير المدى وذلك لتتبع حركة الطائرات المدنية في الجو وإرشادها أثناء طيرانها بين المطارات حيث تظهر الموجات المنعكسة عن الطائرات كنقاط مضيئة على شاشة الرادار. ويمكن تحديد مسار الطيران لكل طائرة من خلال متابعة حركات هذه النقاط على الشاشة ضمن دائرة قد يصل نصف قطرها إلى ثمانين كيلومتر. ويقوم المراقبون الجويون المتواجدون في أبراج المراقبة من خلال شاشات الرادارات بتوجيه التدفق المستمر للطائرات القادمة والمغادرة من خلال اختيار أنسب المسارات للطائرات وتحديد زمن إقلاعها وهبوطها وكذلك مساعدة الطيارين عند الهبوط في حالة الطقس الرديء. ويمكن للأنواع الحديثة من الرادارات المسماة برادار المراقبة الثانوي (Secondary Surveillance Radar (SSR) أن تتعرف على هوية الطائرة من خلال نظام اتصالات يتراسل مع جهاز آلي تحمله الطائرة يسمى المستجيب (transponder) يقوم بتزويد المطار بالمعلومات اللازمة عن الطائرة. ويقوم رادار الاقتراب الدقيق (Precision approach radar (PAR)) وبمساعدة برج المراقبة الطائرات على الهبوط بشكل آمن على مدرج المطار خاصة في الأحوال السيئة. ويوجد في معظم الطائرات الحديثة أنواع مختلفة من الرادارات تساعد الطيار أثناء الطيران وعند الإقلاع والهبوط فعلى سبيل المثال يستخدم رادار مقياس الارتفاع (radar altimeter) لتحديد ارتفاع الطائرة عن سطح تضاريس الأرض وخاصة عند



الإقلاع والهبوط. ويوجد في الطائرات أيضا رادارات توضع في مقدمة الطائرة لمعرفة الأحوال الجوية في مسار الطائرة وذلك لمساعدة الطيار على تجنب الأحوال السيئة واتخاذ القرارات المناسبة عند الهبوط.

رادارات الملاحة البحرية

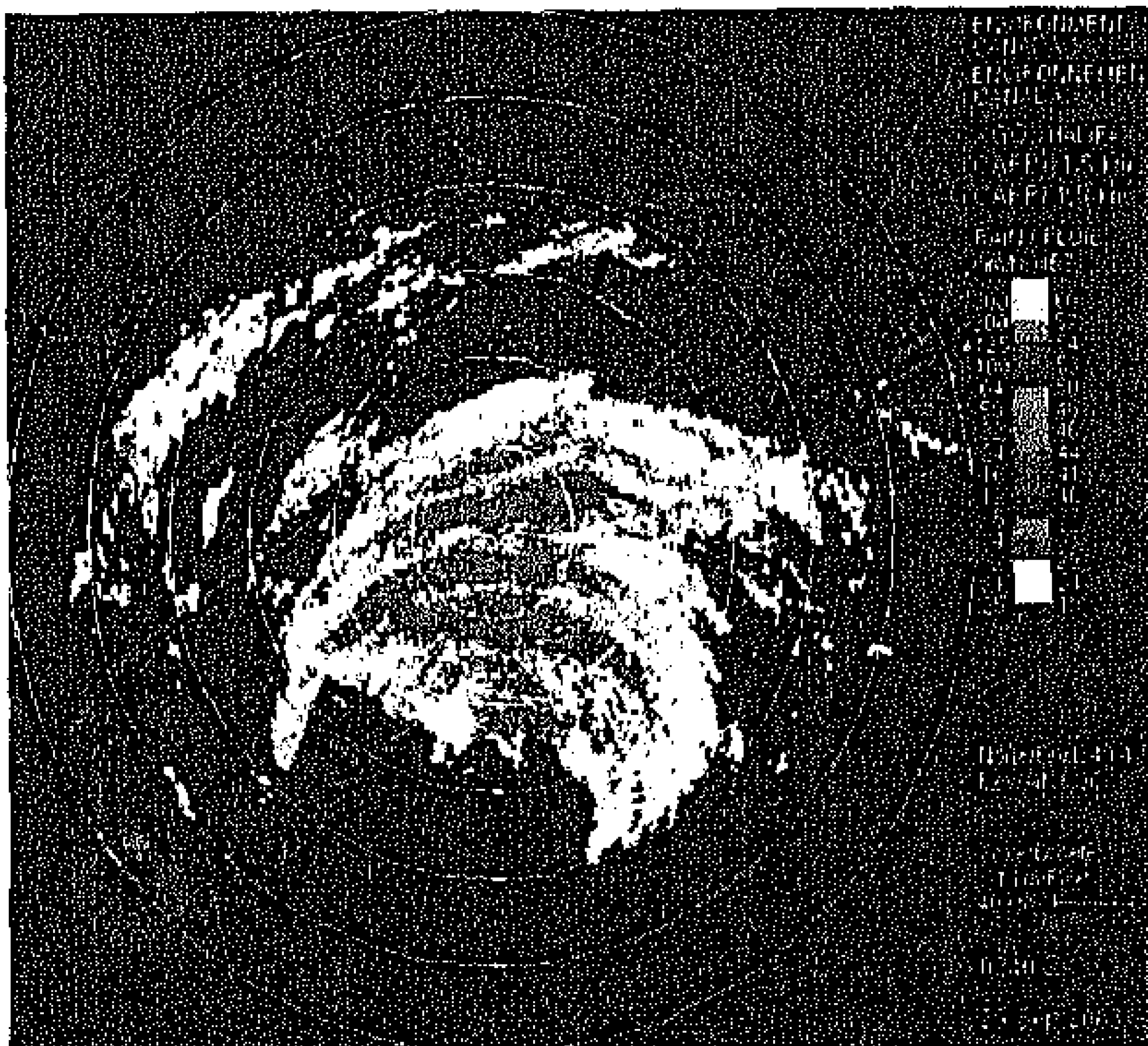
يستخدم الرادار على نطاق واسع في مختلف أنواع السفن وناقلات النفط والبوارج الحربية وحاملات الطائرات حيث يقوم الرادار بتحديد أماكن السفن الأخرى في عرض البحر وكذلك تحديد أماكن الشواطئ والجزر الصغيرة والصخور والجبال الثلجية التي تعترض طريقها مما يجنبها الاصطدام بها. وفي الموانئ يستخدم الرادار لكشف وجود السفن وتحديد بعدها في المياه المحيطة بالميناء وذلك لتنظيم دخولها وخروجها من



الميناء. إن تصميم رادارات الملاحة البحرية أصعب بكثير من تلك التي في الملاحة الجوية بسبب كون الهدف ملاصقا لسطح الماء وبارتفاعات قليلة نسبيا وكذلك فإن الهدف يبدأ بالاختفاء تدريجيا عن نظر الرادار بسبب تكور الأرض. وعادة ما يتم استخدام رادارات بترددات منخفضة نسبيا تقل عن واحد جيقاهيرتز وذلك لتقليل امتصاص الموجات من قبل الماء والتي تنتشر ملاصقة لسطحه. ولا يتجاوز أقصى مدى لهذه الرادارات المائة كيلومتر بسبب تكور الأرض كما ذكرنا وعادة ما يتم وضع الرادار على أبراج عالية لزيادة مدى رؤيتها.

رادارات الطقس (Weather Radars)

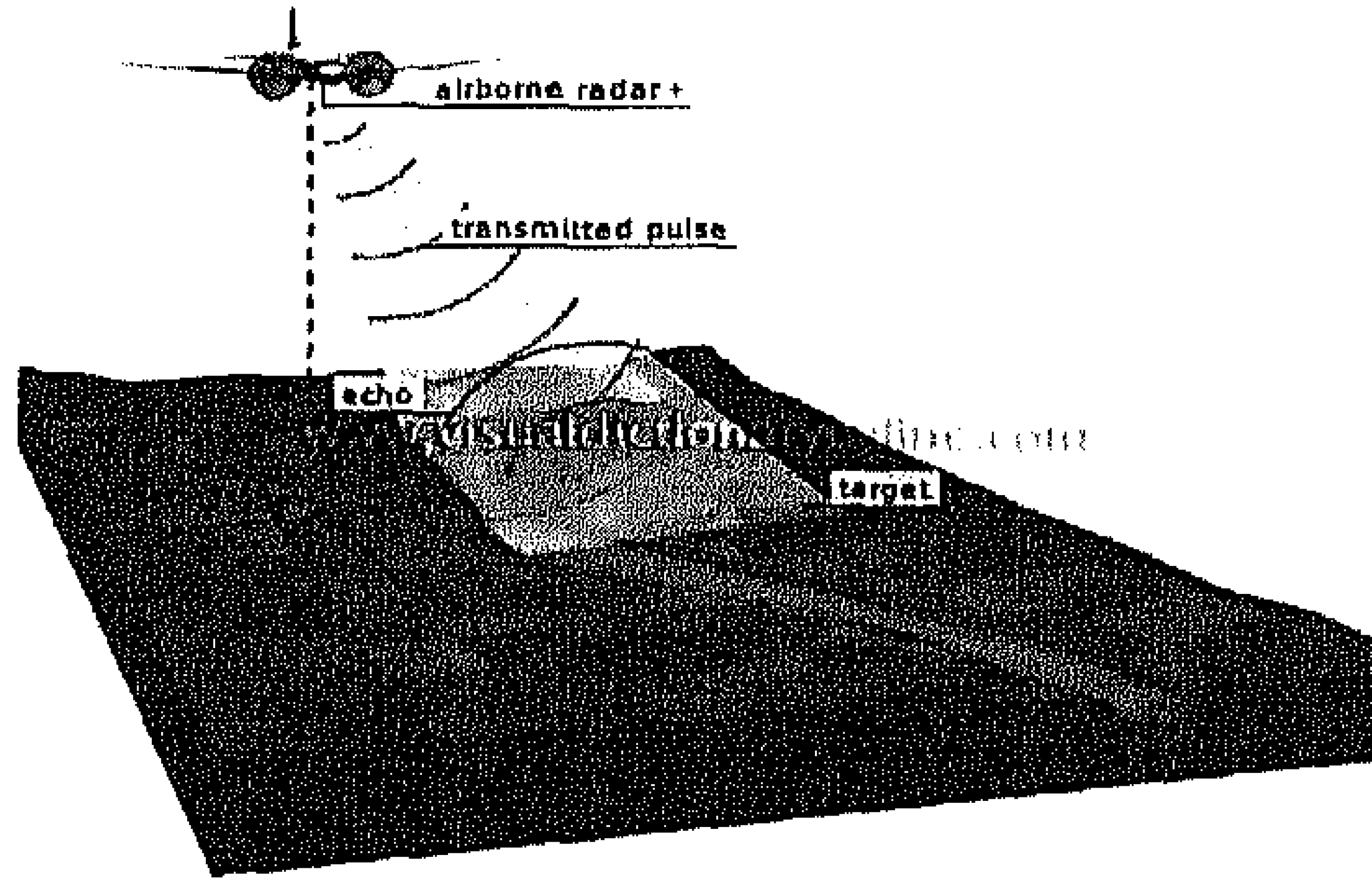
تستخدم الرادارات لمساعدة العاملين في دوائر الأرصاد الجوية في معرفة أحوال الطقس والتنبؤ بها حيث تقوم الرادارات بالكشف عن وجود الغيوم والأمطار والثلوج والعواصف والأعاصير بمختلف أنواعها ورسم خرائط لها على شاشات الرادار. ويقوم العاملين في مجال الأرصاد الجوية باستخلاص كثير من المعلومات عن حالة الجو من حيث كثافة الغيوم وما تحمله من أمطار وثلوج وارتفاعاتها



وحجمها واتجاه سيرها وكذلك كثافة هطول الأمطار والثلوج. وتستخدم أنواع معينة من الرادار لتحديد سرعة واتجاه الرياح في طبقات الجو المختلفة. وتستخدم رادارات الطقس النوع النبضي حيث تتناسب شدة النبضة المرتدة طرديا مع كثافة الغيوم والأمطار والثلوج والرمال ويمكن تحديد سرعة حركتها باستخدام تأثير دوبلر. ويجب أن يتم اختيار التردد الذي يعمل عليه رادار الطقس بشكل دقيق وضمن مدى معين وهو ما بين ثلاثة إلى ثلاثين جيقاهيرتز وذلك لأن شدة النبضة المرتدة تعتمد على طول الموجة المرسلة بالمقارنة مع أحجام قطرات المطر وحبات البرد وقطع الثلج. وتتراوح قدرات الموجة المرسلة في رادارات الطقس بين مائة واط وخمسين كيلوواط وذلك حسب نوع الرادار والمدى الذي يغطيه. وتستخدم رادارات الطقس الحديثة أنظمة معالجة الصور (image processing) للحصول على صور دقيقة لحالة الطقس. وتستخدم المطارات والموانئ رادارات قصيرة المدى لا يتجاوز مدها المائة كيلومتر لمعرفة أحوال الطقس حولها وذلك لإرشاد الطائرات والسفن وإعطاء النصائح المناسبة للطيارين والربان عند دخول أجواءها.

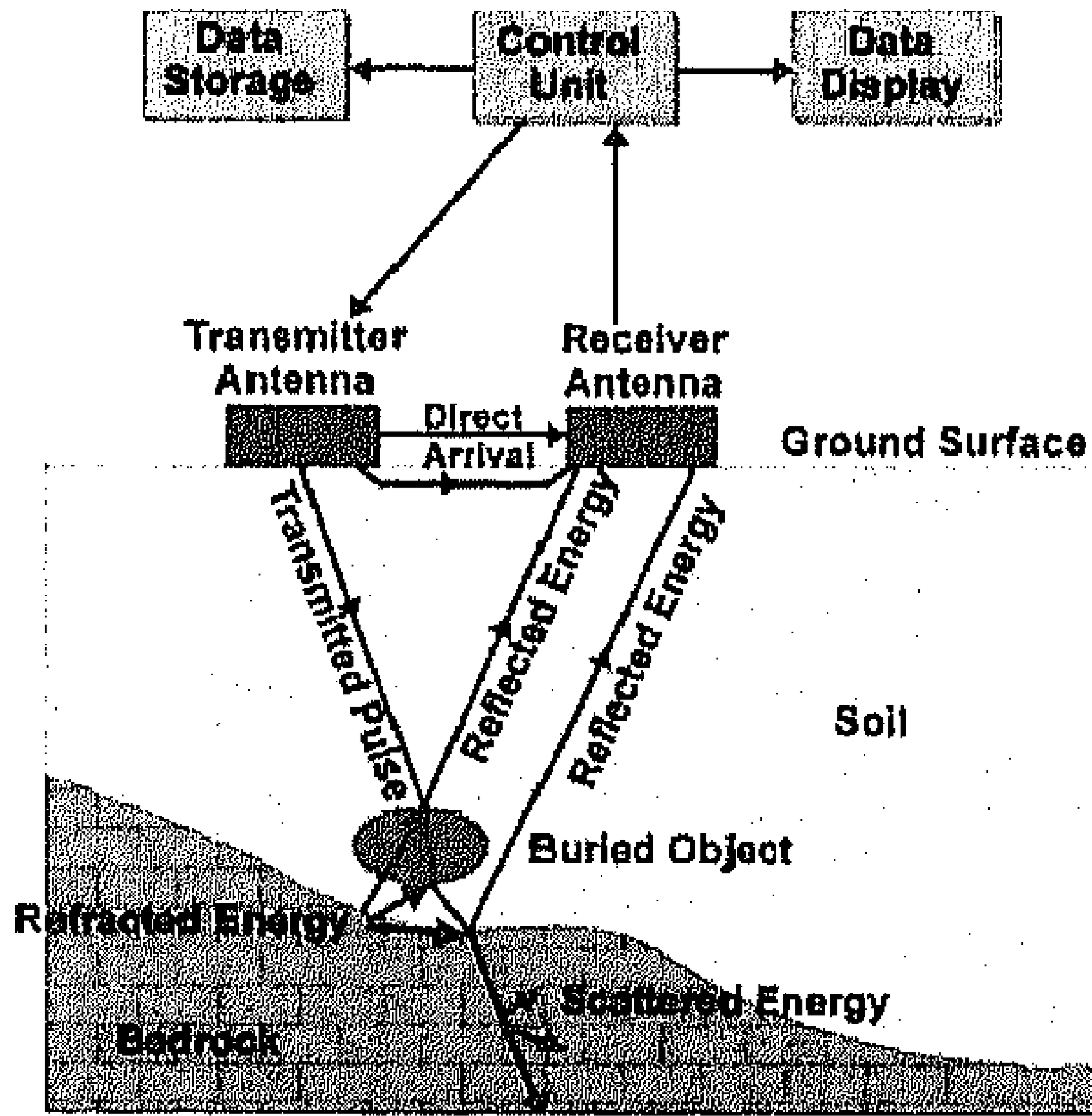
الاستشعار عن بعد (Remote sensing)

تستخدم الرادارات المحمولة بالأقمار الصناعية والطائرات لدراسة سطح الأرض وما عليه من مكونات وذلك من خلال إرسال نبضات كهرومغناطيسية بترددات معينة ومن ثم التقاط النبضات المرتدة عن سطح الأرض والقيام بتحليلها باستخدام معالجات الإشارات الرقمية لرسم صور عن المنطقة الممسوحة. وتستخدم هذه الصور لاستخلاص معلومات مهمة عن طبيعة الأرض التي تم مسحها من قبل شعاع الرادار ومن هذه المعلومات طبيعة التضاريس الأرضية وطبوغرافيتها ونوع الغابات والنباتات والمحاصيل المزروعة والآفات الزراعية والظروف المناخية والبيئية والبراكين والأعاصير والفياضانات والثروات المعدنية والمياه الجوفية والبترول. ويوجد أنواع مختلفة من رادارات الاستشعار عن بعد يتم تصميمها بناءا على نوع المعلومات المراد استشعارها وغالبا ما يعتمد هذا على مقدار التردد المستخدم في الرادار فالبحث عن ثروات الأرض يتطلب استخدام ترددات تقل عن واحد جيقاهيرتز وذلك لقدرتها على اختراق سطح الأرض بينما يتطلب رسم خارطة طبوغرافية ترددادت أعلى من ذلك بكثير للحصول قدرة تمييز عالية لتضاريس الأرض.



الرادار الخارق للأرض (Ground Penetrating Radar)

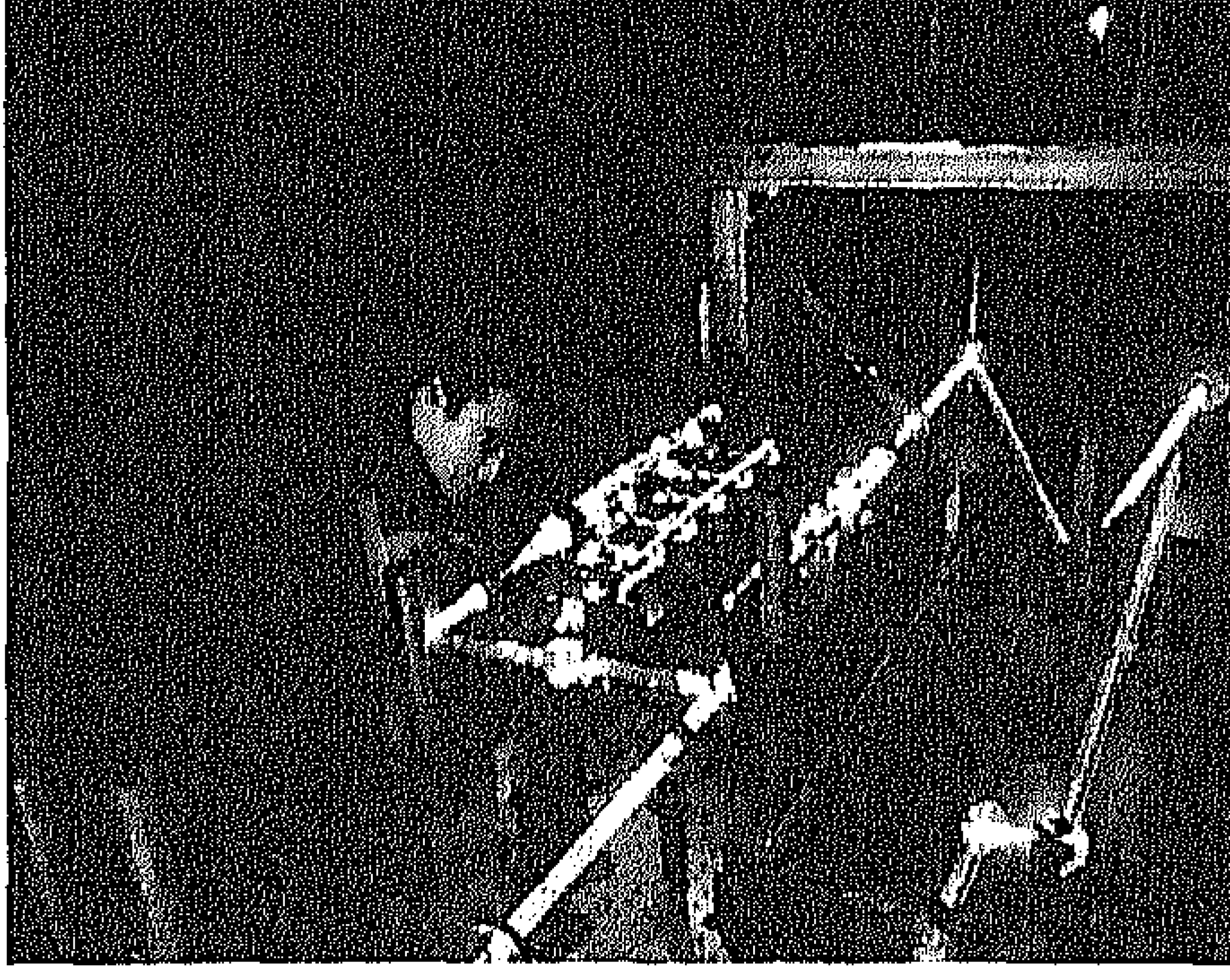
يستخدم الرادار الخارق للأرض في تطبيقات لا حصر لها في الجيولوجيا لمعرفة عمق وسمك الطبقات الصخرية وأنواع التربة والرواسب ووضع خرائط للتراكيب الجيولوجية وتحديد الكهوف والشقوق الطبيعية والصدوع وكشف المياه الجوفية وآبار البترول والغاز. ويستخدم في التطبيقات البيئية لكشف التسريبات في خزانات المياه ووضع خرائط لمراقبة المواد الملوثة في المياه السطحية وكشف مواقع دفن النفايات وتحديد مواقع خزانات الوقود المدفونة وبراميل الزيت وتحديد مواقع التسربات النفطية. ويستخدم في مجال الهندسة المدنية لعمل الاختبارات الخرسانية وتحليل رصف الطرق وتحديد الفراغات وقوة الرصف وتحديد مواقع المرافق العامة المدفونة مثل أنابيب المياه والمجاري الحديدية والبلاستيكية والخرسانية وكذلك الكيبلات الكهربائية والهاتفية. ويستخدم في مجال الآثار لتحديد مواقع الأشياء المعدنية المدفونة كالكنوز ومواقع الكهوف السطحية والآبار والأجسام الأثرية. ويستخدم في التطبيقات العسكرية لكشف حقول الألغام بشكل عام والكشف عن مكان اللغم بالتحديد. وتستخدم الرادارات في تطبيقات أخرى يصعب حصرها حيث تستخدمه الشرطة في قياس سرعة المركبات على الطرق لضمان عدم تجاوزها السرعات المقررة. وتستخدم في أنظمة الكشف والمتابعة الفضائية حيث تقوم الرادارات بتوجيه الصواريخ الحاملة للأقمار الصناعية والمركبات الفضائية منذ انطلاقها إلى أن تضعها في مداراتها وتقوم بمراقبة الأقمار الصناعية والتأكد من بقائها في المواقع المخصصة لها في مداراتها. وتستخدم بعض أنواع الرادارات البسيطة في المركبات الحديثة لتنبيه وتحذير السائق عند الاقتراب الشديد لمركبته من المركبات الأخرى والأرصفة والحواجز وذلك لتجنيبه الاصطدام بها. وتستخدم كذلك في مراقبة ومتابعة الأجسام التي تأتي من الفضاء الخارجي وتقترب من الأرض كالمذنبات والشهب والنيازك وغيرها. وقد تم استخدام الرادار لدراسة سطح القمر ومعرفة كامل تضاريسه قبل إرسال المركبات الفضائية إليه وهبوطها عليه. وتستخدم الرادارات في بعض أنظمة الإنسان الآلي المتحركة وفي المركبات التي تم إنزالها على أسطح الكواكب لتجنيبها الاصطدام بما حولها من أجسام.



الفصل العاشر

الليزر

10-1 تمهيد

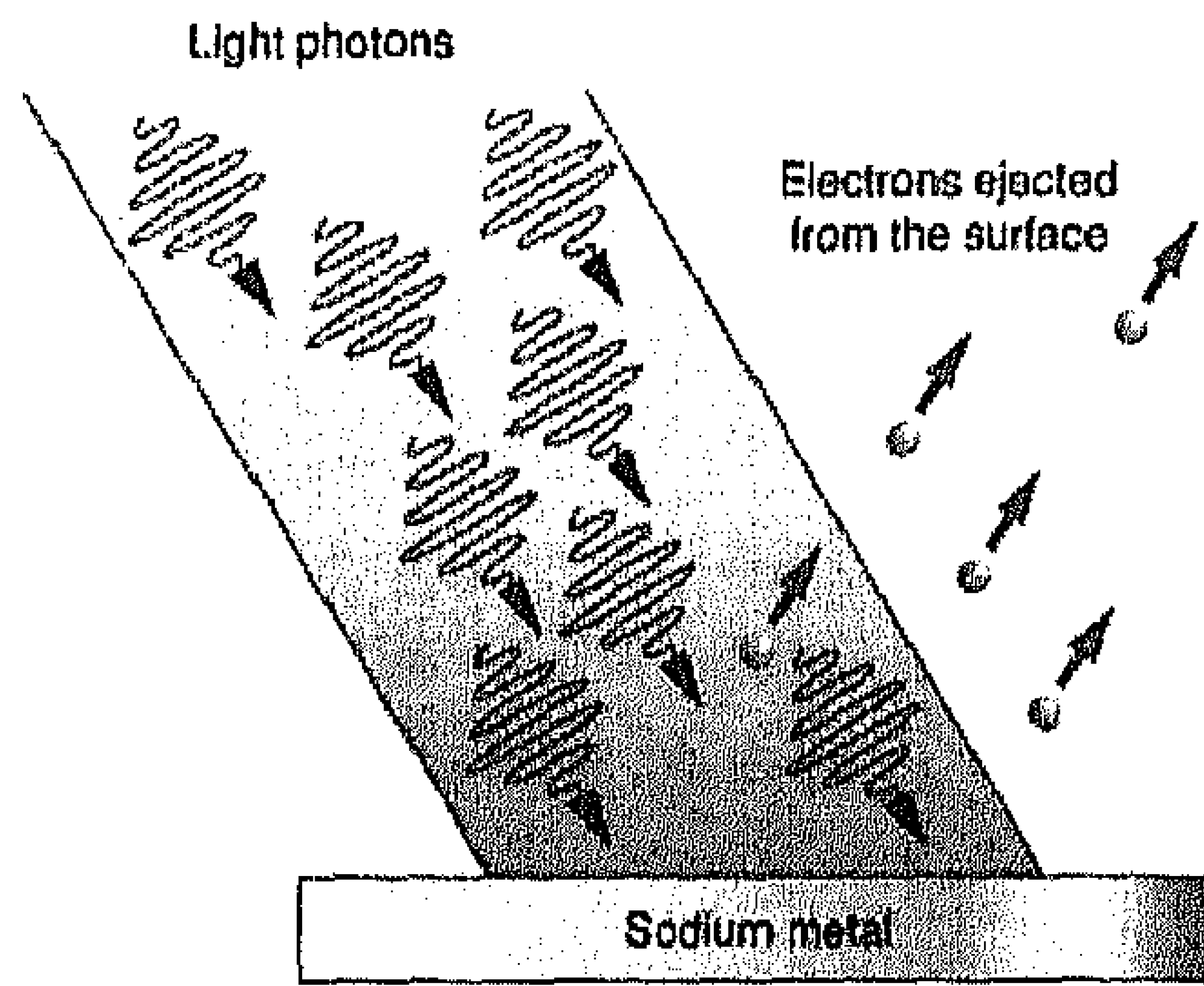


الليزر هو مصدر لتوليد الضـــوء المرئـــي وغير المرئي والذي يتميز بمواصفات مميزة لا توجد في الضوء الذي تصدره بقية مصادر الضوء الطبيعية والصناعية. وكلمة ليـــزر (Laser) هـــي اختصـــار للأحرف الأولى لكلمات الجملة الإنجليزية: (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) والتي تعني (تضخيم الضوء بالانبعـــاث المستحث للإشعاع). يقوم الليزر بتوليد نوع مميز من الضوء يختلف في خصائصه عن الضـــوء الطبيعـــي الصادر عن الشمس والنجوم والضوء الاصطناعي الصادر عن مختلف أنواع المصابيح الكهربائيـــة. ويتميـــز ضوء الليزر بعدة خصائص أهمها أن كامل الطاقة الضوئية تتركز في شعاع له مقطع عرضي متنـــاهي فـــي الصغر قد لا يتجاوز في بعض أنواعه عدة ميكرومترات مربعة ولهذا فإنه يسير لمســـافات طويلـــة محتفظـــا بطاقته ضمن هذا الشعاع الدقيق. وبما أن جميع الطاقة الضوئية التي يولدها الليزر تتركز ضمن هذا المقطع الصغير للشعاع فإنه بالإمكان الحصول على شدة إضاءة قد تزيد بملايين المرات عن شدة الضـــوء الصـــادر عن الشمس أو المصابيح الكهربائية. أما الخاصية الثانية فهي أن ضوء الليزر يتكون من حزمة ضـــيقة جـــدا من الترددات بعكس أنواع الضوء الأخرى التي تتكون من طيف واسع من الترددات ولذا فهـــي تبـــدو للعـــين كضوء أبيض يحتوي على جميع ألوان الطيف المرئي بينما يبدو ضوء الليزر للعين بلون واحد عالي النقـــاء كاللون الأحمر والأخضر والأزرق.

ويعتبر اختراع الليزر من أكثر الاختراعات إثارة في هذا العصر حيث لم يكن يخطر على بال أحـــد أن هذا المصدر الضوئي البسيط سيفتح أبوابا لا حصر لها من التطبيقات ذات الأهمية البالغة في حياة البشر. فلقد تساءل العلماء فيما بينهم بعد تصنيع أول ليزر في عام 1960م عن ما ستكون التطبيقـــات لهـــذا الجهـــاز العجيب حيث أن الدافع وراء الأبحاث المكثفة التي أدت لاختراع الليزر كان لإشباع فضول العلماء لـــيس إلا وذلك على العكس من كثير من الاختراعات والتي كانت الحاجة وراء اختراعها. ولكن وبعد مضي ســـنوات معدودة تلقف العلماء في مختلف التخصصات هذا الاختراع العجيب واستخدموه في تطبيقات لا حصر لها وقد أحدث ثورة في حياة البشر لا تقل عن الثورة التي أحدثها الصمام الإلكتروني والترانزســـتور. فعلـــى ســـبيل المثال فقد أدرك مهندسو الاتصالات الكهربائية أهمية هذا الاختراع العظيم بعد أن تبين لهم أن ضوء الليـــزر يمكن أن يستخدم بديلا عن الموجات الراديوية كحامل للمعلومات وذلك لقدرته على حمل كمية معلومات تفوق بآلاف المرات قدرة أعلى الحاملات الراديوية وذلك بسبب ارتفاع ترددات ضـــوء الليـــزر. وأمـــا مهندســـو

الميكانيك فقد بدأت الأحلام تراودهم بعد أن تبين لهم شدة تركيز ضوء الليزر في استخدامه لقطع وقص الألواح المعدنية وغير المعدنية بدقة متناهية وبالشكل الذي يريدونه لتلبي حاجة مختلف الصناعات وكذلك استخدامه في عمليات لحام المعادن. أما المهندسون المدنيون فقد وجدوا في شعاع الليزر المرئي الذي يسير لمسافات طويلة على شكل خيط دقيق ضالتهم المنشودة في أعمال المساحة والإنشاءات بمختلف أنواعها وذلك لضبط استقامتها وقياس الأبعاد. أما الأطباء فقد كان لهم نصيب وافر من هذا الاختراع فقد استخدموه كمشرط عالي الدقة لا يترك نزفا وراءه وقد يصل لأماكن في جسم الإنسان لا يمكن أن تصل إليه مشارطهم المعدنية إلا بعد حدوث ضرر كبير. واستخدموه في تصحيح البصر وإزالة الأورام وتفتيت الحصى وحفر الأسنان وإزالة البثور والحبوب والتجاعيد والدمامل وغيرها من أمراض وعيوب الجلد.

10-2 تاريخ الليزر



لقد تمكن الفيزيائي الفذ ألبرت أينشتاين (Albert Einstein) في عام 1917م من وضع الأسس النظرية التي يقوم عليها عمل الليزر وذلك في أبحاثه حول الظاهرة الكهروضوئية (photoelectric). وفي هذه الظاهرة لاحظ العلماء أنه عند تسليط إشعاع كهرومغناطيسي ضوئي على سطح معدني فإن الإلكترونات تنبعث من هذا السطح فقط إذا تجاوز تردد الضوء قيمة حدية معينة أما إذا كان تردد الضوء أقل من ذلك فإن الإلكترونات لا تنبعث أبدا مهما بلغت شدة الضوء المسلط. وبقيت هذه الظاهرة لغزا يحير العلماء إلى أن تمكن أينشتاين في عام 1905م من حل هذا اللغز بعد أن اثبت أن الضوء ذي طبيعة موجية وجسيمية وذلك على العكس من الاعتقاد السائد حينئذ وهو أن الضوء ذي طبيعة موجية فقط. وقد أثبت أينشتاين أن الضوء وكذلك بقية أنواع الإشعاعات الكهرومغناطيسية ليست سيلا متصلا من الطاقة بل تتكون من وحدات صغيرة يحمل كل منها كمية محددة من الطاقة أطلق عليها اسم الفوتونات (photons). وتتناسب كمية الطاقة التي يحملها الفوتون الواحد من الضوء طرديا مع تردد الضوء أما ثابت التناسب فهو رقم فيزيائي ثابت لا يتغير أبدا على كامل مدى الطيف الكهرومغناطيسي وقد أطلق عليه اسم ثابت بلانك (Planck's constant) نسبة إلى الفيزيائي الألماني الشهير ماكس بلانك (Max Planck) الذي وضع أسس نظرية الكم (quantum theory). ولقد ساعد هذا الاكتشاف إلى جانب تفسيره لهذه الظاهرة على وضع نماذج صحيحة لتركيب الذرة وتبين أنها تتكون من إلكترونات تدور في مدارات



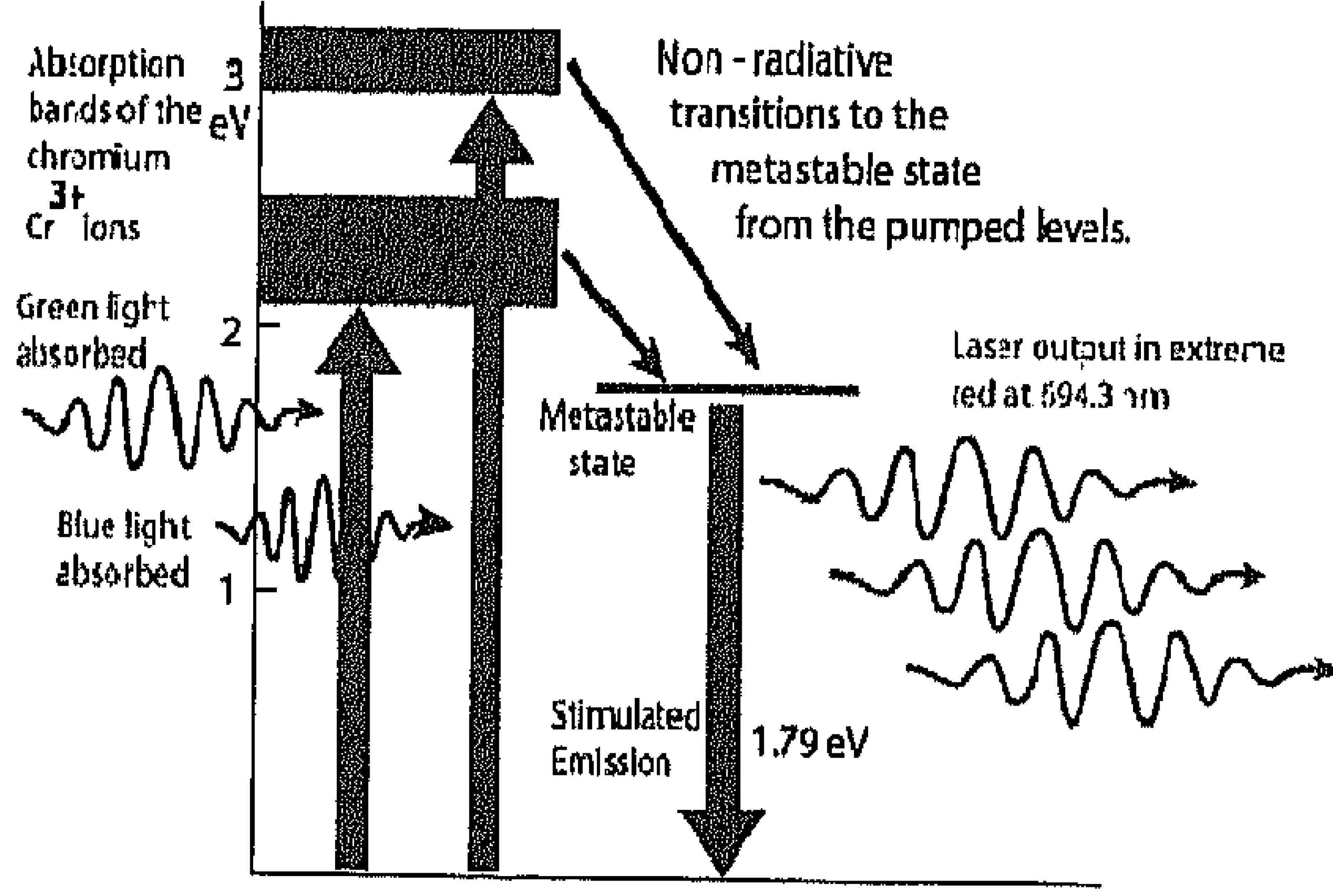
محددة حول النواة وأن الإلكترونات لا تنتقل من مدار منخفض الطاقة إلى آخر بطاقة أعلى إلا من خلال تسليط إشعاعات كهرومغناطيسية عليها وبحيث تكون طاقة فوتون الإشعاع أعلى من فرق الطاقة بين المدارين. أما عند هبوط إلكترون من مدار عالي الطاقة إلى مدار منخفض الطاقة فإن فرق الطاقة ينبعث على شكل إشعاع بحيث تكون طاقة الفوتون مساوية تماما لفرق الطاقة بين المدارين.

ولقد قام أينشتاين بدراسة التفاعلات بين الإشعاعات الكهرومغناطيسية وذرات المادة وتمكن من وضع المعادلات التي تحكم هذه التفاعلات والتي سميت فيما بعد باسمه وقد تنبأ من خلال هذه المعادلات بوجود ما يسمى بظاهرة الإشعاع المستحث (Stimulated Emission) والتي يقوم عليها عمل الليزر. ولقد حاول العلماء جاهدين للحصول على الإشعاع المستحث إلا أن جهودهم باءت بالفشل ووصل اليأس ببعضهم إلي إنكار وجود مثل هذه الظاهرة الضوئية. وفي عام 1947م تمكن الفيزيائي الأمريكي وليس لامب (Willis Lamb) عمليا من إثبات وجود ظاهرة الإشعاع المستحث. وفي عام 1954م تمكن الفيزيائي الأمريكي تشارلز تاون (Charles H. Townes) من الحصول على إشعاع مستحث في نطاق الأمواج الدقيقة (microwave) وأطلق اسم الميزر (Maser) على هذا الجهاز وهو مختصر للجملة الإنكليزية (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation). وبهذا الإنجاز تجددت آمال العلماء للحصول على إشعاع مستحث في النطاق الضوئي المرئي أو غير المرئي ومن ثم تصنيع الليزر. وفي عام 1955م اقترح الفيزيائيان الروسيان بروكوروف وباسوف (Prokhorov and Basov) استخدام الضخ الضوئي (optical pumping) للحصول على ما يسمى التوزيع المقلوب للإلكترونات وهو أحد شروط عمل الليزر كما سنبين ذلك بعد قليل. وفي عام 1960م تمكن الفيزيائي الأمريكي ثيودور ميمان (Theodore Maiman) من تصنيع أول ليزر في نطاق الضوء المرئي وهو يتكون من قضيب اسطواني من الياقوت النقي تم صقل جانبيه بدقة متناهية وقد تم لف قضيب الياقوت بمصباح كهربائي مكون من أنبوب زجاجي مملوء بغاز الزنون. وعند تشغيل المصباح الكهربائي عمل الضوء الصادر عنه على إثارة ذرات الكروميوم الموجودة في الياقوت فقامت بإشعاع ضوء أحمر صافي خرج على شكل نبضات من أحد جانبي قضيب الياقوت. وفي عام 1960م تمكن الفيزيائي الإيراني علي جافان (Ali Javan) والأمريكي وليم بنت (William Bennett) من تصنيع ليزر باستخدام غازي الهيليوم والنيون وكان يعطي إشعاعا مستمرا وليس نبضيا كما هو الحال في ليزر الياقوت. وفي عام 1962م تمكن المهندس الأمريكي روبرت هول (Robert Hall) من تصنيع ليزر أشباه الموصلات (Semiconductor laser) الذي يتميز بصغر حجمه. وفي عام 1964م تم تصنيع ليزر ثاني أكسيد الكربون والذي يتميز بقدرة إشعاعه العالية.

3-10 مبدأ عمل الليزر

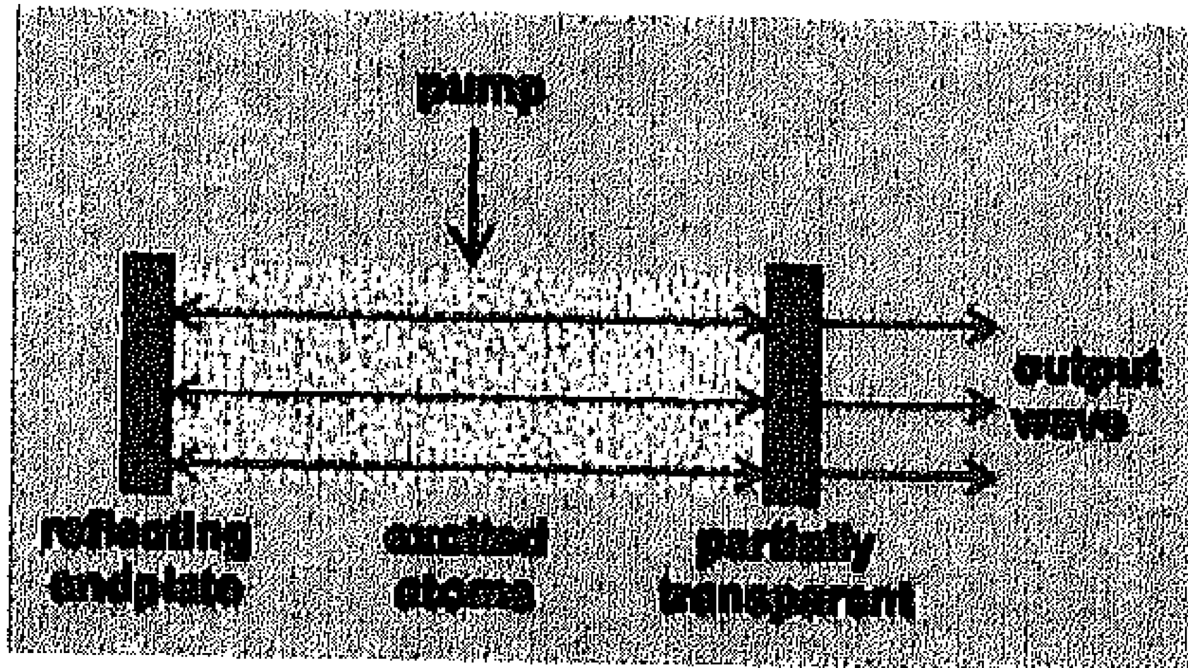
قام أينشتاين في عام 1917م بدراسة تفاعل الأمواج الكهرومغناطيسية أو ما يسمى اختصارا بالإشعاع (Radiation) مع ذرات المادة ووجد أن هناك ثلاثة أنواع من التفاعلات وهي أولا الامتصاص(Absorption) وفيها تقوم ذرات المادة بامتصاص فوتونات الإشعاع المسلط عليها وتعمل طاقة الإشعاع الممتص على رفع الإلكترونات من مدارات منخفضة الطاقة إلى مدارات عالية الطاقة وتصبح الذرات في حالة الإثارة (excited state). ولا يتم امتصاص الفوتونات من قبل المادة إلا إذا كانت طاقتها تزيد عن فرق الطاقة بين مدارات الإلكترونات لذرات تلك المادة ولذا تكون المواد شفافة لجميع الإشعاعات

التي تقل ترددالتها عن قيم محددة تتحدد من التركيب الذري لتلك المواد كما هو الحال مع الزجاج. أما التفاعل الثاني فهو الانبعاث التلقائي (Spontaneous Emission) وفيها تقوم الذرات المثارة بإشعاع موجات كهرومغناطيسية نتيجة نزول الإلكترونات من المدارات عالية الطاقة إلى المدارات منخفضة الطاقة. إن الإشعاع التلقائي الصادر عن المادة المثارة يسمى إشعاعا غير مترابط (Noncoherent radiation) وذلك



لأن الإلكترونات تنزل من تلقاء نفسها وبطريقة عشوائية بين مدارات الذرة المختلفة ولذلك فإن هذا الإشعاع يحتوي على عدد كبير جدا من الترددات وتعتمد مصادر الضوء العادية على ظاهرة الانبعاث التلقائي في عملها. أما التفاعل الثالث فهو الانبعاث المستحث (Stimulated Emission) وفيها تقوم الذرات المثارة بإشعاع موجات كهرومغناطيسية نتيجة نزول الإلكترونات من المدارات عالية الطاقة إلى المدارات منخفضة الطاقة ولكن ليس بطريقة تلقائية وعشوائية كما في الانبعاث التلقائي بل نتيجة لحثها بإشعاع له تردد محدد.

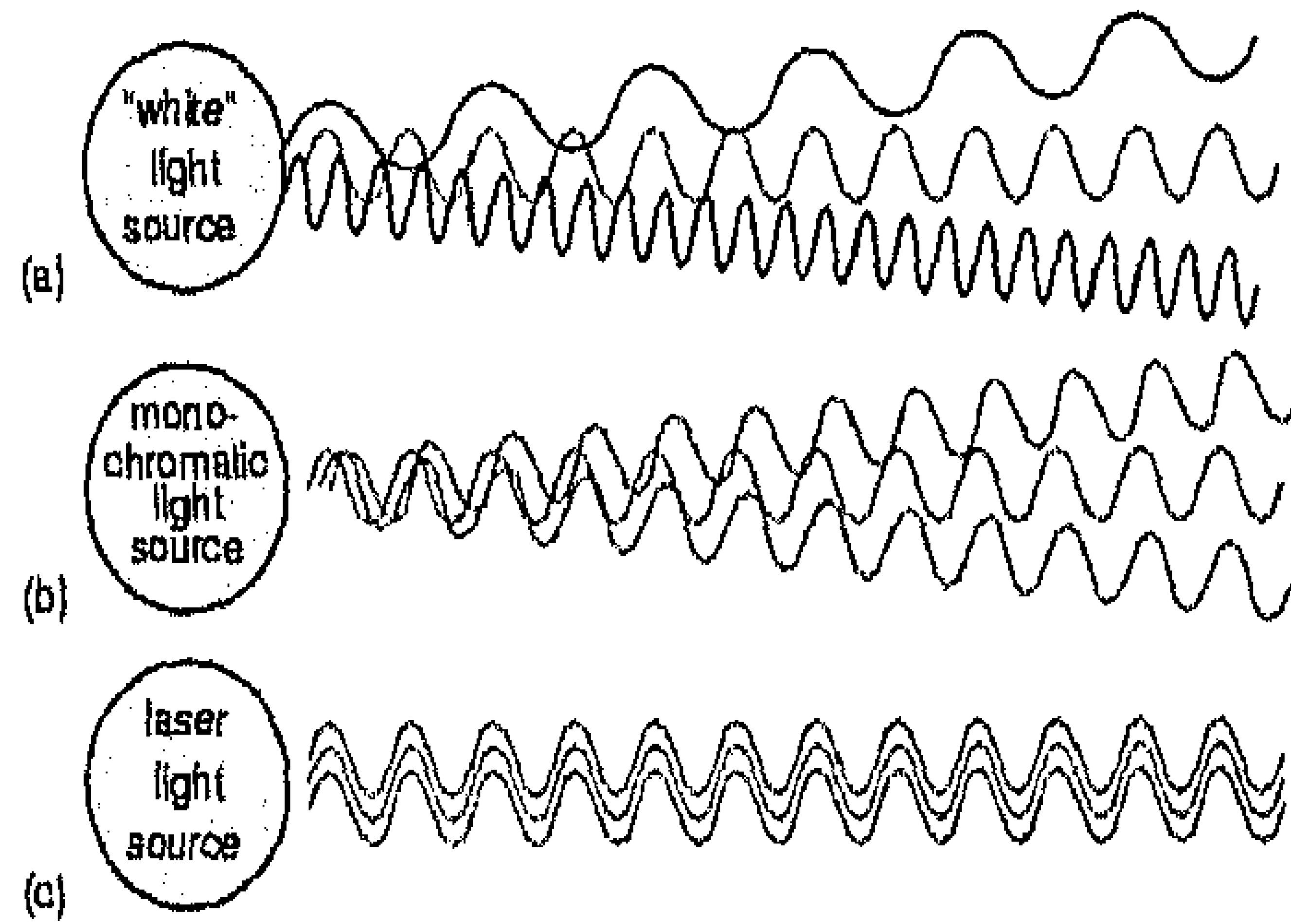
إن الإشعاع المستحث الصادر عن المادة المثارة يسمى إشعاع مترابط (Coherent) وذلك لأن الموجات الكهرومغناطيسية الناتجة عن نزول الإلكترونات لها تردد (Frequency) وطور (Phase) يساويان تماما تردد وطور الأمواج التي قامت بحث الإلكترونات على الإشعاع ولذلك فإن هذا الإشعاع له تردد واحد من الناحية النظرية. ويمكن حساب تردد الإشعاع المنبعث من المادة من خلال تقسيم فرق الطاقة بين المدارين الذي انتقل بينهما الإلكترون بثابت بلانك. إن المبدأ الرئيسي الذي يقوم عليه عمل الليزر هو ظاهرة الانبعاث المستحث التي شرحناها آنفا وهناك شروط ثلاثة تلزم لكي يولد الليزر ضوءا مترابطا من خلال هذه الظاهرة. أما الشرط الأول فهو توفر ما يسمى بالتوزيع المقلوب (Population inversion) للإلكترونات في ذرات



المادة التي ستولد الضوء والذي يعني أن عدد الإلكترونات في الحالة المثارة يجب أن يكون أعلى منها في الحالة غير المثارة. وهذا الشرط لا يتحقق إلا في مواد معينة تسمى الوسط الفعال (active medium) التي يكون عدد المدارات في نطاق توصيلها (conduction band) ثلاثة أو أكثر وبحيث يوجد مدار شبه مستقر (metastable) بين المدار منخفض الطاقة والمدار عالي الطاقة. أما الشرط الثاني فهو توفر مصدر يقوم بضخ الإلكترونات (Pumping) من المدارات منخفضة الطاقة (غير المثارة) إلى المدارات عالية الطاقة (المثارة) وذلك للحصول على التوزيع المقلوب للإلكترونات. أما الشرط الثالث فهو وجود نظام تغذية راجعة موجبة (Positive feedback) لكي يعمل الليزر كمذبذب (Oscillator) يقوم بتوليد تردد الضوء المطلوب وغالبا ما يتم استخدام المرايا (Mirrors) للحصول على هذه التغذية الراجعة.

وعلى هذا فإن الليزر يعمل من خلال ضخ الإلكترونات باستخدام مصدر ضخ خارجي كالضوء أو التيار الكهربائي من المدار الأدنى إلى المدار الأعلى ومن ثم تهبط الإلكترونات المثارة من خلال الانبعاث التلقائي من المدار الأعلى إلى المدار شبه المستقر (metastable state) والذي يقع بين المدارين الأدنى والأعلى حيث تبدأ الإلكترونات بالتراكم في هذا المدار لتنتج التوزيع المقلوب المنشود. وإذا ما مر فوتون ضوئي بتردد محدد على المادة وهي في وضع التوزيع المقلوب فإنه سيحث بعض الإلكترونات الموجودة في المدار شبه المستقر للنزول إلى المدار الأدنى منتجة عددا من الفوتونات الضوئية لها نفس تردد وطور واتجاه الفوتون الذي قام بحثها أي أن الضوء المتولد سيكون له تردد واحد أي أنه أحادي اللون وذلك من الناحية النظرية. وتستخدم المرايا لعكس بعض الفوتونات المتولدة لتمر من خلال ذرات المادة الفعالة لتوليد مزيدا من الفوتونات التي لها نفس الخصائص. وعادة ما تكون أحد المرايا ذات معامل انعكاس يقرب من الواحد وذلك لتعكس جميع الضوء الساقط عليها بينما يكون معامل انعكاس المرآة الثانية أقل من واحد وذلك لتسمح لجزء من الضوء المتولد للخروج منها لاستخدامه في التطبيقات المختلفة. وبما أن الفوتونات المستحثة لها نفس تردد الفوتونات التي قامت بحثها وتسير بنفس اتجاه سيرها فإن ضوء الليزر الناتج سيكون أحادي اللون تقريبا ويسير باتجاه واحد وذلك على العكس من طبيعة ضوء المصادر الأخرى. ويخرج الضوء المتولد من الليزر في العادة إما على شكل نبضات (pulsed laser) أو على شكل موجة مستمرة (continuous wave laser) والذي يتحدد من التركيب الذري للمادة الفعالة ونوع وكمية الضخ المستخدم وكذلك طريقة تركيب الليزر.

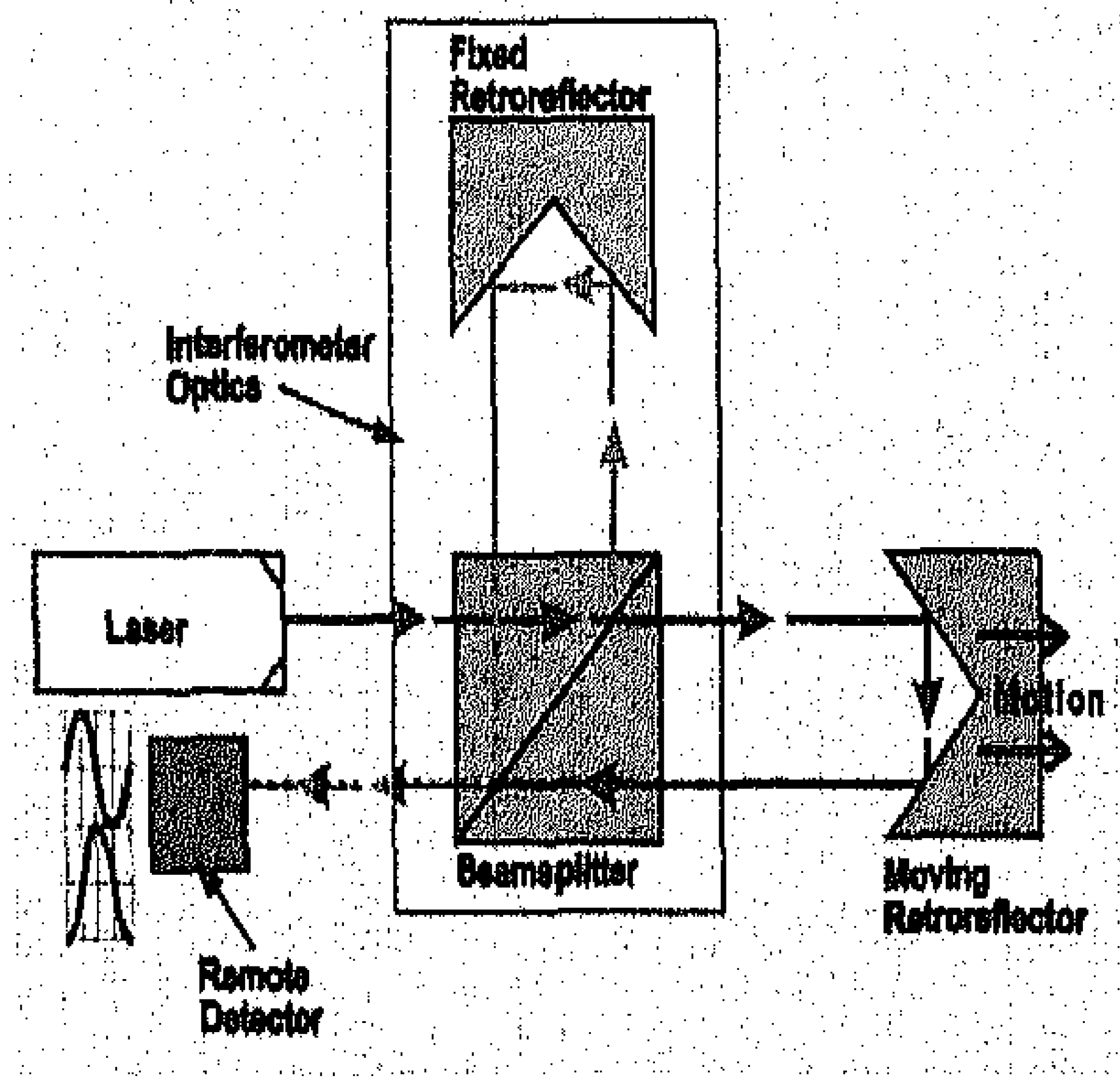
خصائص ضوء الليزر



يتميز ضوء الليزر على بقية أنواع الضوء الصادر عن المصادر الطبيعية كالشمس والمصابيح التقليدية والصناعية كالمصابيح الكهربائية بعدة خصائص مهمة تؤهله لاستخدامه في كثير من التطبيقات. ومن أهم هذه الخصائص ما يسمى بالاتجاهية (Directionality) وهي أن شعاع الليزر له زاوية انفراج (divergence angle) غاية في الصغر بحيث يمكنه أن يسير لمسافات طويلة دون أن تتشتت طاقته. فعلى سبيل المثال فإن زاوية انفراج شعاع ليزر نيون-هيليوم تبلغ جزئين من عشرة آلاف جزء من الدرجة وهذا يعني أنه إذا ما تم إرسال شعاع هذا الليزر من الأرض إلى القمر فسيكون قطره على القمر بحدود كيلومتر ونصف علما بأن المسافة بين الأرض والقمر تبلغ 384 ألف كيلومتر. إن قطر شعاع هذا الليزر يبلغ ملليمترين عند خروجه من الليزر بينما سيكون قطره خمسة ملليمترات فقط بعد أن يسير ألف كيلومتر. وتتحدد زاوية انفراج شعاع الليزر من عدة عوامل أهمها عرض الشعاع عند خروجه من المصدر وطول موجة الإشعاع حيث تتناسب عكسيا مع عرض الشعاع الابتدائي وطرديا مع طول الموجة أي أن الزاوية تقل مع زيادة عرض الشعاع ونقصان طول الموجة. وتستغل خاصية الاتجاهية في تطبيقات كثيرة كقياس المسافات البعيدة والقصيرة على السواء والتأشير على الأهداف بدقة متناهية كما في أنظمة

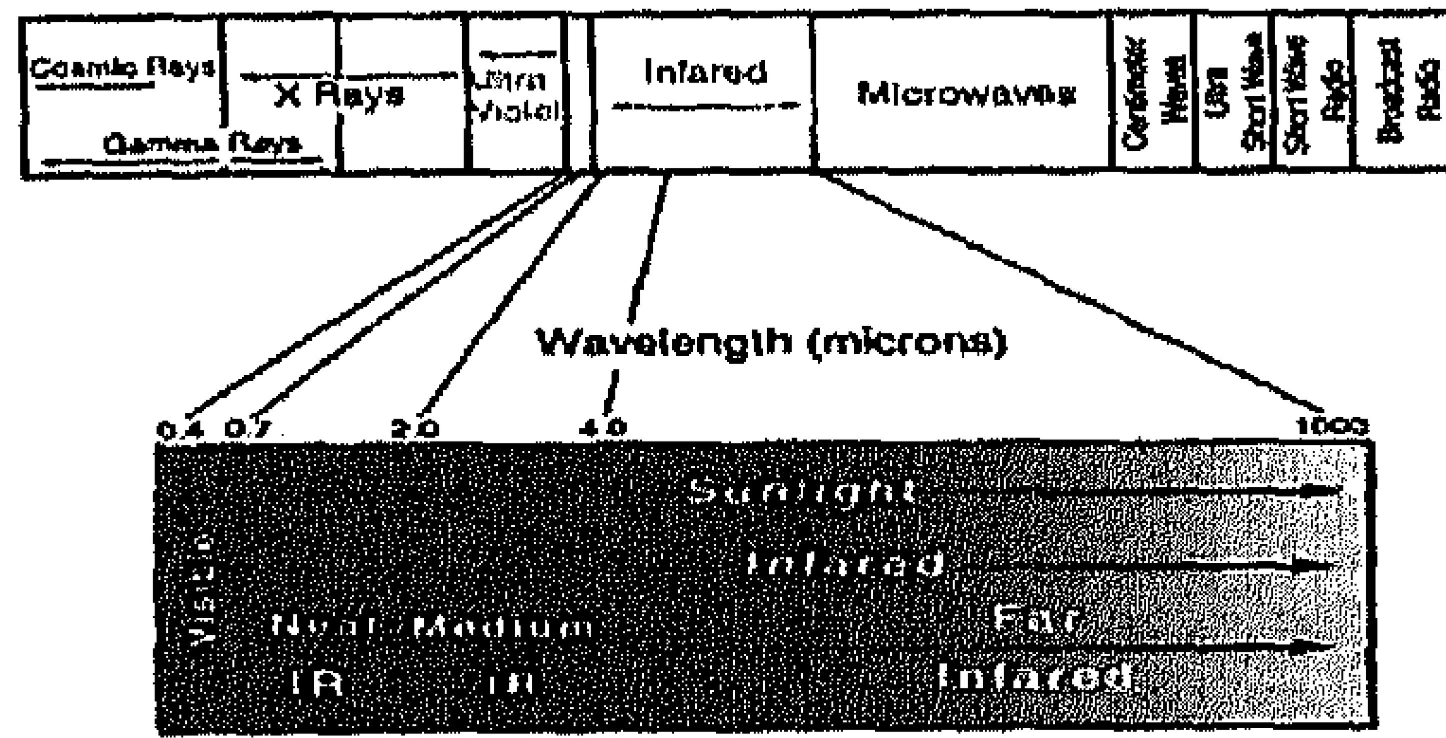
المساحة ورسم الخطوط المستقيمة في أعمال الإنشاءات المختلفة. أما الخاصية الثانية فهي علو شدة ضوء الليزر (high intensity light) وذلك بسبب أن شعاع الليزر له مقطع عرضي صغير جدا قد لا يتجاوز في بعض أنواعه عدة ميكرومترات مربعة وبما أن جميع الطاقة الضوئية الصادرة عن الليزر رغم قلتها تتركز ضمن هذا المقطع الصغير فإنه بالإمكان الحصول على شدة إضاءة قد تزيد بملايين المرات عن شدة الضوء الصادر عن الشمس أو المصابيح الكهربائية ولهذا فيمكن لشعاع الليزر أن يسير لمسافات كبيرة جدا دون أن يخبو ضوءه. ولتوضيح ذلك فإن ليزر بقدرة واحد واط وبمقطع عرضي مساحته ألف ميكرومتر مربع يعطي ضوء شدته بليون واط لكل متر مربع أي يزيد بمليون مرة عن شدة ضوء الشمس على سطح الأرض. وتستغل هذه الخاصية للضوء في حفر وقطع ولحام المواد بدقة كبيرة وفي إجراء العمليات الجراحية ومعالجة كثير من أمراض العيون والجلد.

أما الخاصية الثالثة فهي أحادية اللون (Monochromaticity) حيث أن ضوء الليزر يتكون من حزمة ضيقة جدا من الترددات الضوئية بعكس أنواع الضوء الأخرى التي تتكون من طيف واسع جدا من الترددات ولذا فإنها تبدو للعين كضوء أبيض يحتوي على جميع ألوان الطيف المرئي بينما يبدو ضوء الليزر بلون واحد فقط عالي النقاء. وتستغل هذه الخاصية في استخدام ضوء الليزر كحامل للمعلومات بدلا من الحاملات الراديوية خاصة في أنظمة اتصالات الألياف الضوئية التي تتطلب وجود مصادر ضوئية أحادية اللون أي أن عرض نطاق ترددات ضوءها غاية في الصغر. أما الخاصية الرابعة فهي الترابط (Coherence) وهي أن الترددات التي يتكون منها شعاع الليزر لها نفس الطور (phase) وكذلك نفس الاستقطاب (polarization) وتستغل هذه الخاصية للحصول على أشكال تداخلية (interference patterns) لا يمكن الحصول عليها من خلال استخدام أنواع الضوء الأخرى. ويستخدم التداخل الضوئي (Interferometry) في أشعة الليزر في تطبيقات لا حصر لها كما في قياس المسافات والسرعات ودراسة تركيب المواد والتصوير ثلاثي الأبعاد. أما الخاصية الخامسة فهي أنه يمكن التحكم بجهاز الليزر بحيث يتم إطلاق ضوءه على شكل نبضات بمعدلات محددة ويمكن كذلك التحكم بعرض النبضة ليصل في بعض التطبيقات إلى عدة أجزاء من مليون بليون جزء من الثانية. ومن خلال تقليل عرض النبضة الضوئية فإنه يمكن الحصول على شدة ضوء غاية في العلو قد تصل إلى آلاف الميجاواطات ولكن لفترات زمنية قصيرة جدا وذلك مهما كانت كمية الطاقة التي تحملها النبضة. وتستخدم هذه الخاصية في تطبيقات لا حصر لها كإذابة أو تبخير المعادن أو قطع ولحام مختلف أنواع المواد أو إجراء العمليات الجراحية أو تسريع التفاعلات الكيميائية وحتى النووية. إن أهم عيوب الليزر هو تدني كفاءة تحويل الطاقة فيه حيث تتراوح بين واحد بالمائة وعشرين بالمائة لمعظم أنواعه وهذا يعني أنه يلزم للحصول على واط واحد من ضوء ليزر كفاءته واحد بالمائة تزويده بمائة واط من الطاقة حيث تضيع التسعة وتسعون واط المتبقية كحرارة في داخل جسم الليزر وهذا يتطلب أنظمة تبريد معقدة خاصة في الأنواع التي تنتج قدرات عالية قد تصل لعدة كيلواطات كليزر ثاني أكسيد الكربون.



4-10 أنواع الليزر

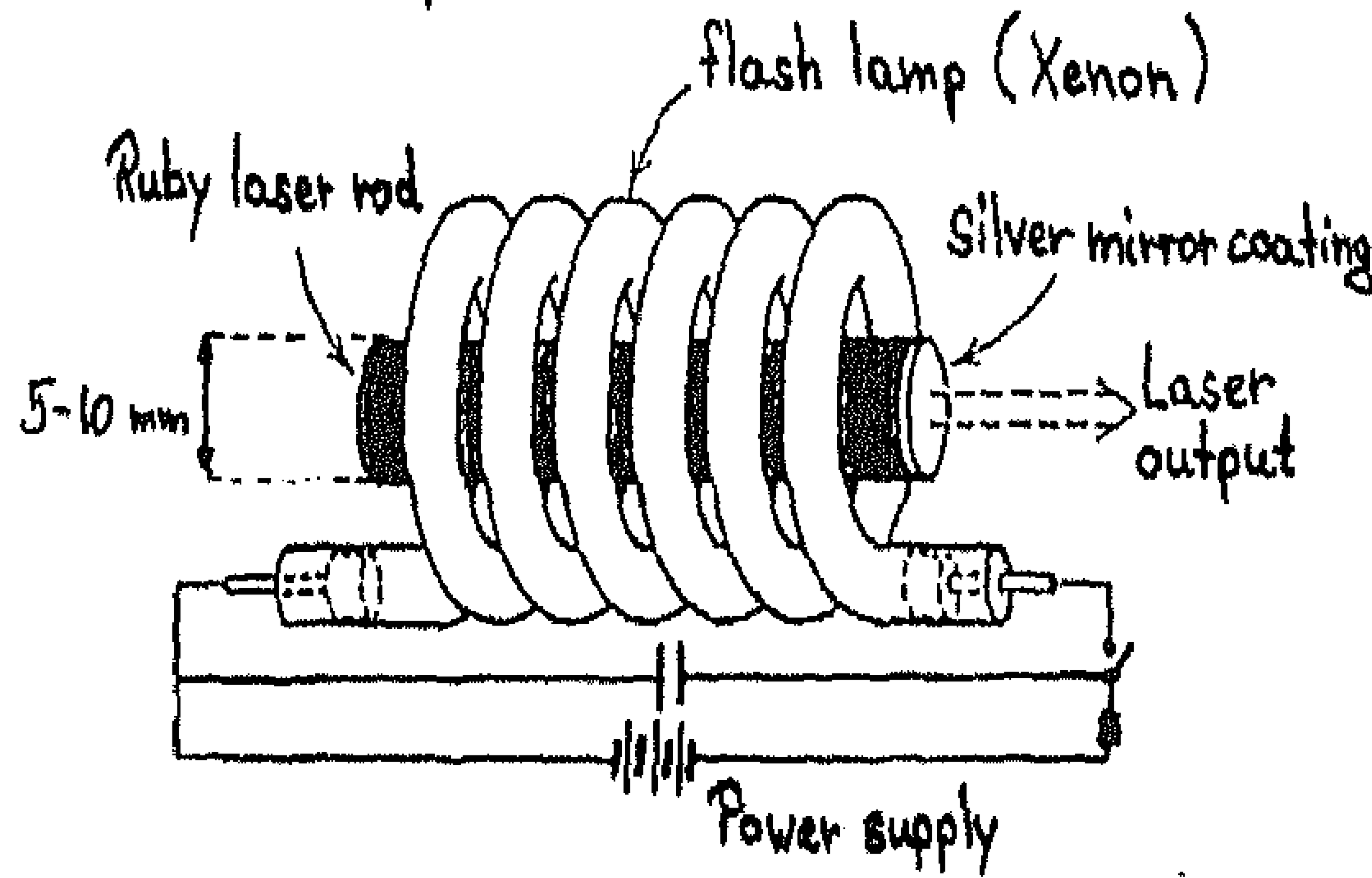
يتحدد نـوع الليـزر ومواصـفات الضـوء الصـادر عنـه مـن نـوع المـادة الفعالـة ونـوع مصـدر الضـخ وكـذلك طريقـة التغذيـة الخلفيـة المسـتخدمة فيـه. وتنقسـم أنـواع الليـزر مـن حيـث طبيعـة المـادة الفعالـة إلـى أنـواع كثيـرة أهمهـا ليـزارات الحالـة الصـلبة والليـزرات الغازيـة والليـزرات شـبه الموصـلة وليـزرات الأصـباغ والليـزرات الكيميائيـة وليـزرات بخـار المعادن. أمـا طريقـة الضـخ فقـد تكـون باسـتخدام الضـوء المرئـي أو غيـر المرئـي أو الأمـواج الكهرومغناطيسـية الراديويـة أو بتمريـر أو تفريـغ التيـار الكهربـائي أو مـن خـلال التفـاعلات الكيميائية. أمـا طريقـة التغذيـة الخلفيـة فتعتمـد علـى نـوع المـادة الفعالـة فقـد تـتم مـن خـلال صقل الأوجـه إذا كانـت فـي الحالـة الصـلبة أو باسـتخدام المرايـا إذا كانـت فـي الحالـة السـائلة أو الغازيـة وتعتمـد كـذلك علـى شـكل المرايـا فيمـا إذا كانـت مسـطحة أو مقعـرة ودرجـة إنعكاسـيتها (reflectivity). وفـي كـل نـوع مـن هـذه الأنـواع الرئيسـية يوجـد أنـواع فرعيـة تتمايز بخصـائص مختلفـة مثـل طـول موجـة الضـوء وشـدة الضـوء المنبعـث ومسـاحة مقطـع الشـعاع وزاويـة انفـراج الشـعاع وفيمـا إذا كـان الضـوء المنبعـث متواصـلا (continuous) أو نبضـيا (pulsed) وإمكانيـة الـتحكم بمعـدل وعـرض النبضـات وكـذلك حجـم ووزن جهـاز الليـزر و قيمـة الجهـد والتيـار اللازمـين لتشـغيله وكفـاءة التحويـل وعمـر التشـغيل الافتراضـي.



ويتـوفر فـي الأسـواق الآن ليـزرات بـأطوال موجـة تبـدأ بمائـة نـانومتر وتنتهـي عنـد ألـف ميكرومتـر أي أنهـا تغطـي كامـل طيـف الأشـعة فـوق البنفسـجية وكامـل طيـف الضـوء المرئـي (مـن 400 إلـى 760 نـانومتر) وكامـل طيـف الأشـعة تحـت الحمـراء. ولكـن معظـم أنـواع الليـزرات تعطـي ضـوءا فـي المنطقـة المرئيـة والمنطقـة تحـت الحمـراء القريبـة(near IR) والمتوسـطة(medium IR) وجـزء مـن المنطقـة فـوق البنفسـجية. أمـا كميـة الطاقـة التـي تولـدها الليـزرات فتتـراوح مـن أجـزاء المللـي واط وتصـل لعـدة عشـرات كيلـواط إذا كان الضوء متصلا أمـا إذا كـان علـى شـكل نبضـات فقـد تصـل القـدرة القصـوى لألـف بليـون واط ولكم لفترات زمنية بالغة القصر تقاس بأقل من البيكوثانية.

ليزرات الحالة الصلبة (Solid-State Lasers)

تتكون ليزرات الحالة الصلبة من جسم زجاجي أو بلوري أو حتى خزفي يتم تطعيمه بذرات مادة فعالة تنطبق عليها شروط الانبعاث المستحث. وعادة ما يكون الليزر على شكل قضيب أسطواني يتم صقل وجهيه ليعملا كمرايا عاكسة لتحقق شرط التغذية الخلفية. أما نظام الضخ فيها فهو في الغالب الضوء الصادر من مصابيح غازية كهربائية يتم ملؤها بغاز مناسب لتعطي تردد ضوء الضخ المطلوب ويتم لف أنبوب المصباح على جسم قضيب الليزر بشكل حلزوني. وفي الأنواع الحديثة بدأ باستخدام ثنائيات الليزر (laser diodes) في عملية الضخ بدلا من المصابيح الغازية وذلك لصغر حجمها وانخفاض أثمانها حيث يتم تسليط ضوء ثنائي الليزر مباشرة على قضيب ليزر الحالة الصلبة. لقد كان ليزر الحالة الصلبة أول الأنواع ظهورا بعد أن تمكن الفيزيائي الأمريكي ثيودور ميمان (Theodore Maiman) في عام 1960م من تصنيع ليزر الياقوت (Ruby laser) والذي يتكون من قضيب اسطواني من الياقوت النقي ($CrAlO_3$) الذي يحتوى على ذرات الكروميوم الفعالة بشكل طبيعي وقد تم استخدام مصباح غاز الزنون في عملية الضخ ويولد ضوء بطول موجة 694 نانومتر أي ضوء أحمر نقي.

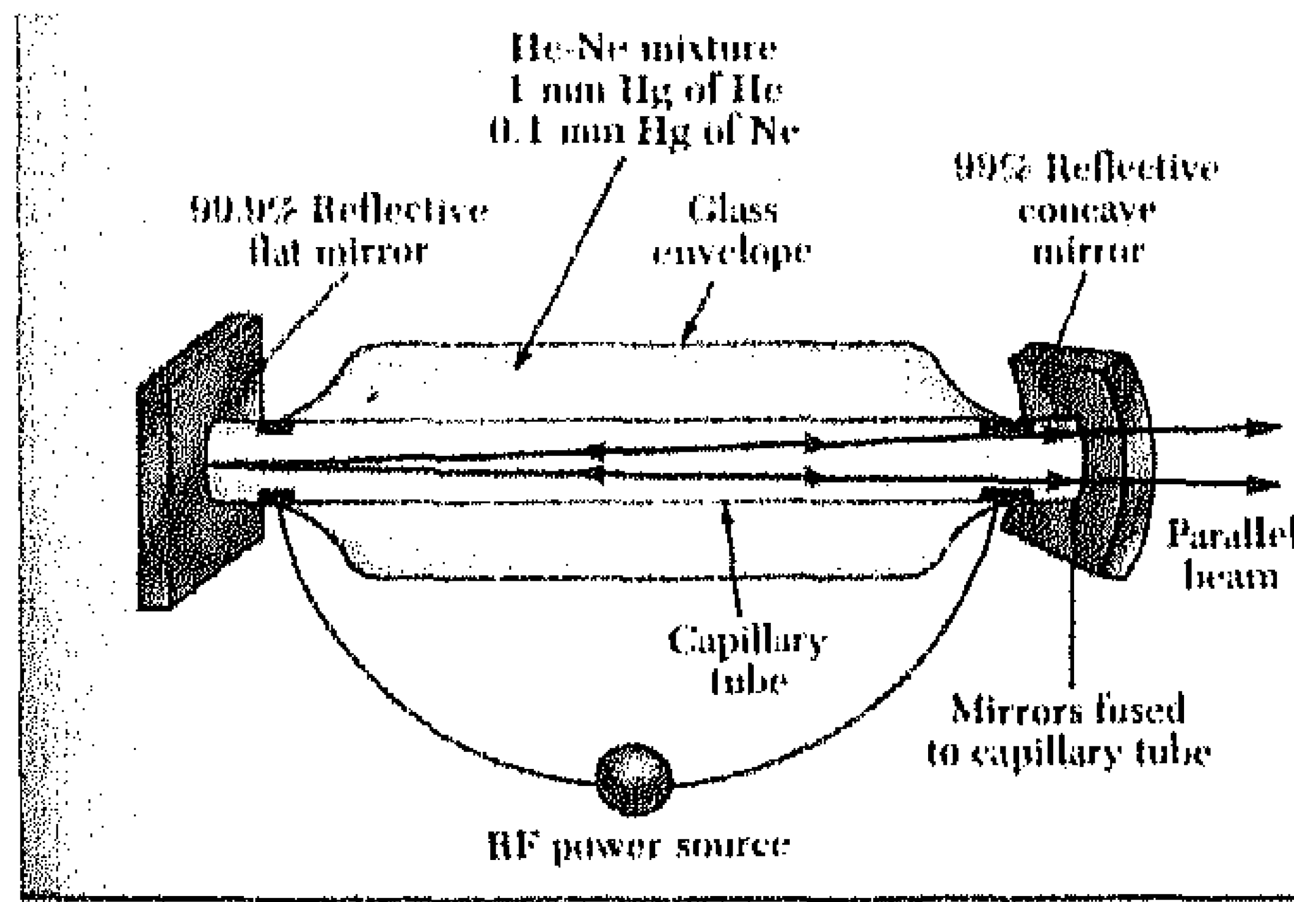


ويوجد الآن عشرات الأنواع من ليزرات الحالة الصلبة ويستخدم في معظم هذه الأنواع أجسام بلورية اصطناعية كمثل حجر الياق (Yttrium Aluminium Garnet(YAG)$Y_3Al_5O_{12}$) وهو حجر كريم اصطناعي يعطي ألوان مختلفة عند تطعيمه بالعناصر المختلفة. وعند استخدامه في الليزر يتم تطعيمه بعناصر فعالة تكون في الغالب من العناصر الأرضية النادرة (rare earth elements) لتعطي طيفا واسعا من الترددات فليزر الياق المطعم بالإربيوم (Er:YAG laser) يعطي ضوء بطول موجة 2940 نانومتر أي المنطقة تحت الحمراء البعيدة وبسبب طول موجته فإنه يستخدم في التطبيقات الطبية ويتميز بأن عملية الضخ تتم عند نطاق واسع من الترددات تمتد من 600 إلى 800 نانومتر. أما ليزر الياق المطعم بالنيوديميوم (Nd:YAG laser) فيعطي ضوء بطول موجة 1064 نانومتر أي في المنطقة تحت الحمراء القريبة ومن ميزاته أنه يولد قدرات عالية قد تصل لعدة كيلواطات مما يناسب الأغراض الصناعية. ولكن من سيئاته أنه يحتاج لمصدر ضخ بطول موجة محدد وهو 807

نانومتر وبعرض نطاق لا يتجاوز واحد نانومتر ولكن عند إضافة الكروم إليه فإن نطاق الضخ يتسع بشكل كبير جدا بحيث يمكن استخدام ضوء الشمس القوي في عملية الضخ. أما ليزر الياق المطعم بالايتربيوم (Yb:YAG laser) فيعطي ضوء بطول موجة 1030 نانومتر أي في المنطقة تحت الحمراء القريبة ومن ميزاته أنه يولد قدرات عالية ويضخ بطول موجة 940 نانومتر وبعرض نطاق 18 نانومتر.

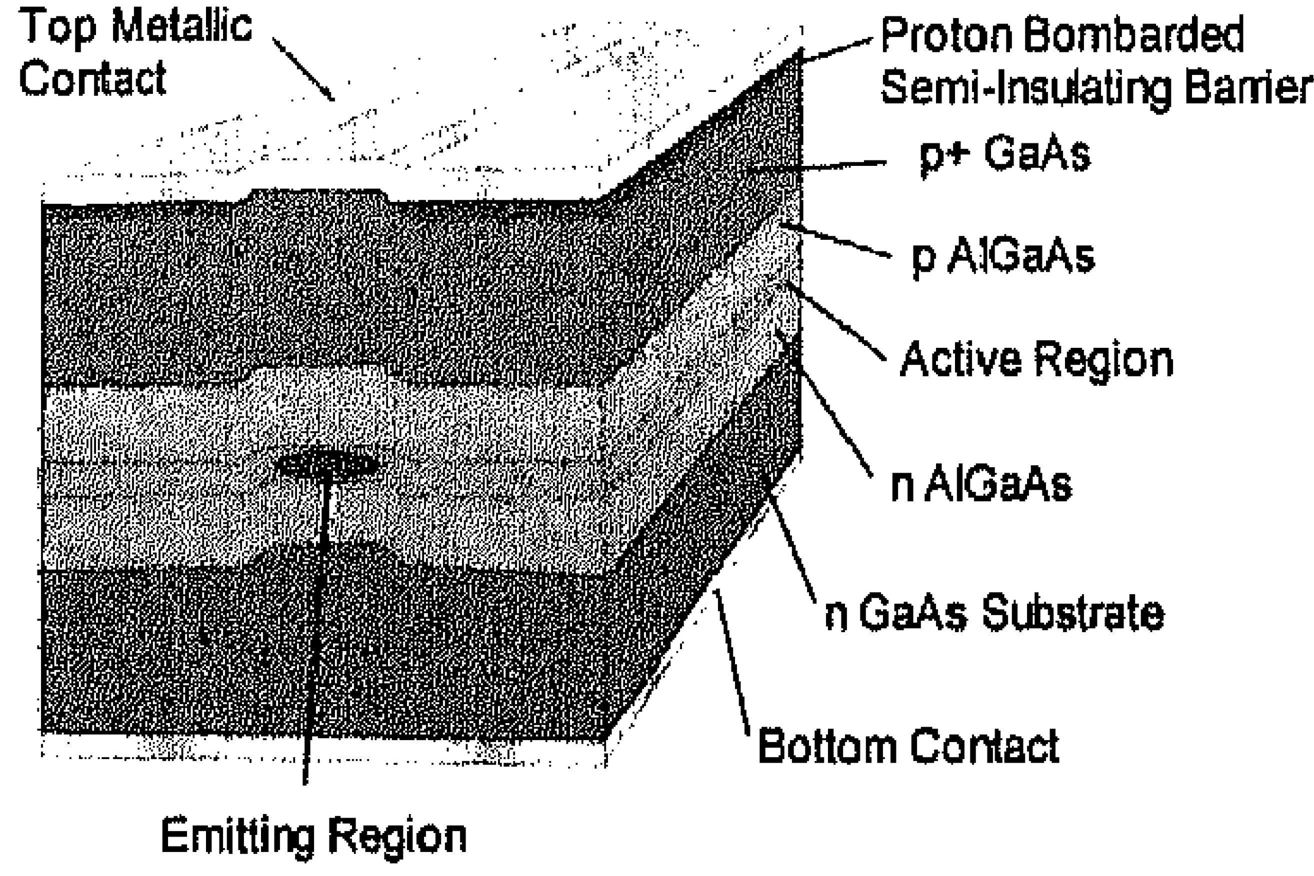
الليزرات الغازية (Gas Lasers)

يتكون الليزر الغازي من أنبوبة مملوءة بغازات معينة تحت ضغط منخفض توضع بين مرآتين عاكستين وتتم عملية الضخ من خلال التفريغ الكهربائي في الغاز وذلك عند تسليط جهد كهربائي عالي بين أقطاب موجودة عند طرفي الأنبوبة. وتتميز الليزرات الغازية برخص أثمانها وبإمكانية تصنيعها بأحجام كبيرة وقدرات عالية وبطول عمر تشغيلي كبير. ومن أشهر أنواع الليزرات الغازية ليزر هيليوم_نيون (HeNe laser) الذي يشع ضوءا أحمر بطول موجة 633 نانومتر وبقدرة تتراوح بين واحد ومائة ملي واط ويتراوح طوله بين خمسة عشر إلى خمسين سنتيميتر ويحتاج إلى ما يقرب من ألف فولت لتفريغ التيار الكهربائي خلال الغاز. أما ليزر ثاني أكسيد الكربون (CO_2 laser)) فإنه من أقوى الليزرات ويشع ضوءا متصلا غير مرئي في نطاق الأشعة تحت الحمراء البعيدة بطول موجة 9.4 ميكرومتر وبقدرات تبدأ من عدة مللي واطات وقد تصل لعدة مئات الكيلواطات وبكفاءة قد تصل إلى عشرين بالمائة ولذا فهو يستخدم في قطع ولحام المعادن بسبب قدرته العالية وكذلك يستخدم بسبب طول موجته الكبيرة في معالجة الأمراض الجلدية وفي الجراحة. أما ليزر النيتروجين فإنه يشع ضوءا نبضيا غير مرئي في نطاق الأشعة فوق البنفسجية بطول موجة 337 نانومتر وبقدرة عند الذروة قد تصل ألف كيلواط. أما ليزر الآرغون فإنه يشع ضوءا متصلا في نطاق الأشعة فوق البنفسجية والمرئية وبقدرات لا تتجاوز الواط الواحد. وأما ليزر الإكسايمر (Excimer) والذي تتكون مادته من خليط من غازات فعالة كالفلور والكلور مع غازات خاملة كالآرغون والزنون بنسب محددة ويشع ضوءا نبضيا غير مرئي في نطاق الأشعة فوق البنفسجية وتتراوح طول موجته بين 126 و337 نانومتر وذلك حسب نوع خليط الغازات وبسبب قصر طول موجته فإن له شعاع دقيق جدا قد يصل قطره إلى ربع ميكرومتر ولذا فإنه يستخدم في الجراحة وفي تصحيح البصر وفي رسم الدوائر الإلكترونية على رقائق أشباه الموصلات.



اللیزرات شبه الموصلة (Semiconductor Lasers)

یتكون اللیزر شبه الموصل من بلورة من مادة شبه موصلة یتم تطعیمها بعناصر مانحة وأخرى مستقبلة لتصبح على شكل وصلة موجب_سالب (PN junction) أي ثنائي (diode) ولذلك یغلب على اسمه ثنائي اللیزر (laser diode). ویتم صقل وجهین متعامدین من أوجه البلورة للحصول على التغذیة الخلفیة وأما عملیة الضخ فتتم من خلال تمریر تیار في هذه الوصلة وإذا ما تجاوزت قیمة التیار قیمة حدیة (threshold) فإن الثنائي یبدأ بتولید ضوء اللیزر.



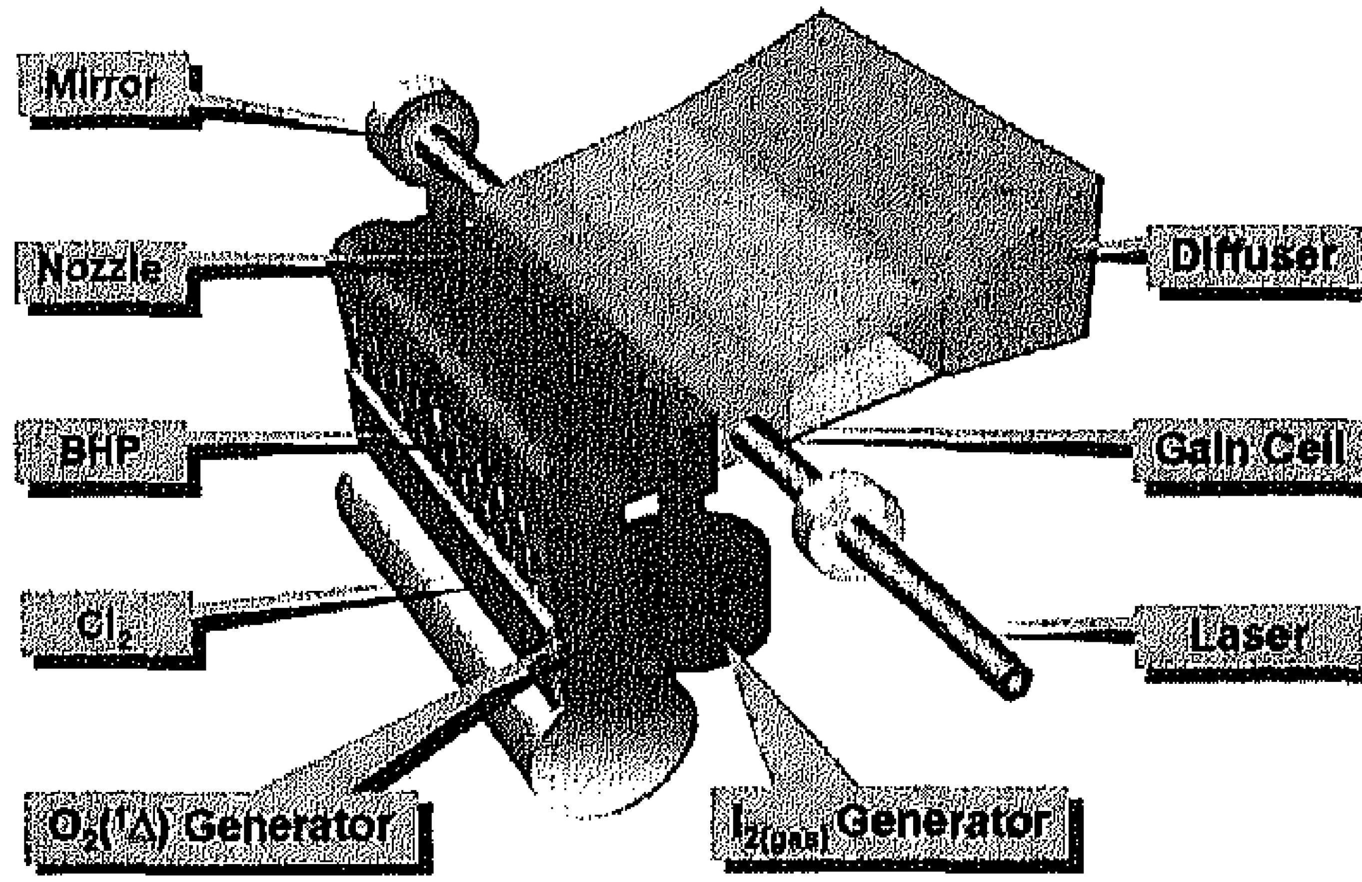
ولكي یعمل اللیزر یحتاج أن یكون سمك المادة الفعالة ضئیل جدا تقاس بالمیكرومترات وذلك للحصول على كثافة تیار عالیة جدا قد تصل لعشرات الآلاف أمبیر للسنتیمتر المربع. إن هذا السمك الضئیل للطبقة الفعالة یعطي عرض شعاع دقیق جدا عند خروجه من اللیزر مما یزید من زاویة انفراج الشعاع كما شرحنا سابقا ولهذا یتطلب استخدام عدسات للحصول على شعاع بزاویة انفراج صغیرة. ولا تستخدم المواد شبه الموصلة الأساسیة وهي السیلیكون والجرمانیوم في هذه اللیزرات لعدم تحقیقها لكامل شروط عمل اللیزر بل یتم استخدام مواد شبه موصلة مركبة من عناصر العامود الثالث والخامس في الجدول الدوري ویمكن الحصول على مدى واسع من الترددات من خلال اختیار نوع العناصر ونسب خلطها. فعلى سبیل المثال فإن لیزر الجالیوم-الزرنیخ (GaAs) یولد ضوء بطول موجي من 800 إلى 900 نانومتر ولیزر (AlGaAs) یولد ضوء تتراوح أطواله الموجیة بین 630 و 900 نانومتر بینما یولد لیزر (InGaAsP) ترددات تتراوح أطوالها الموجیة بین 1000 و 2100 نانومتر. وتتمیز اللیزرات شبه الموصلة بصغر حجمها البالغ والتي قد تصل ما دون حجم حبة العدس بل یمكن تصنیع أعداد كبیرة منها على نفس القاعدة وبسهولة عملیة الضخ فیها من خلال استخدام التیار الكهربائي إلى جانب إمكانیة إنتاجها بكمیات كبیرة جدا. وبسبب هذه المیزات انتشر استخدامها في التطبیقات التي تحتاج لیزرات صغیرة الحجم ولا تستهلك كمیة كبیرة من الطاقة كما في أنظمة الاتصالات الضوئیة وفي الأقراص الضوئیة المدمجة وفي الطابعات وفي أجهزة المساحة وقارئات الباركود وفي خطوط الإنتاج وغیرها الكثیر. وقد أنتج من اللیزرات شبه الموصلة في عام 2004م فقط ما یقرب من 750 ملیون لیزر بینما كان مجموع ما أنتج من بقیة أنواع اللیزر 150 ملیون لیزر.

ليزرات الأصباغ (Dye Lasers)

يستخدم ليزر الأصباغ بعض المواد العضوية كمادة فعالة وغالبا ما تكون مذابة في محلول سائل ومن هذه المواد العضوية الروداماين (Rhodamine) والفلوروسين (Fluorescein) والتتراسين (Tetracene) وغيرها. ويتم وضع المحلول في أنبوبة زجاجية من الكوارتز يتم طلي سطحيها المتقابلين بالفضة للحصول على المرايا العاكسة. وغالبا ما تتم عملية الضخ باستخدام ضوء أنواع أخرى من الليزرات وخاصة التي تولد الضوء الأخضر. وتتميز ليزرات الأصباغ بإمكانية توليف (tuning) للحصول على أطوال أمواج محددة وكذلك بإمكانية الحصول على نبضات ضوئية غاية في القصر والتي تلزم في بعض التطبيقات البحثية فعلى سبيل المثال فإن ليزر الرودامين يمكن توليفه من 570 إلى 640 نانومتر.

الليزرات الكيميائية (Chemical Lasers)

يعتمد هذا النوع من الليزرات في عمله على التفاعلات الكيميائية بين بعض العناصر حيث تثار الإلكترونات إلى المدارات العليا أثناء عملية التفاعل مما يؤدي إلى حدوث التوزيع المقلوب للإلكترونات ومن ثم الانبعاث المستحث. وتتميز الليزرات الكيميائية كليزر الهيدروجين والفلور وليزر الأوكسجين واليود بقدرتها على توليد نبضات ذات قدرات عالية قد تصل إلى الميجاواط ولذلك فإن أكثر استخداماتها في أسلحة الليزر حيث تستخدم نبضات الليزر عالية الطاقة في تدمير الأهداف بدلا من القذائف التقليدية. ولكن العيب في هذا النوع من الليزرات هو في أنها كبيرة الحجم قد تحتل عدة غرف وتحتاج كذلك إلى إمداد مستمر بالمواد الكيميائية لكي تعمل ولذلك فإنه يصعب نقلها إلا من خلال تركيبها في السفن أو في الطائرات الكبيرة.



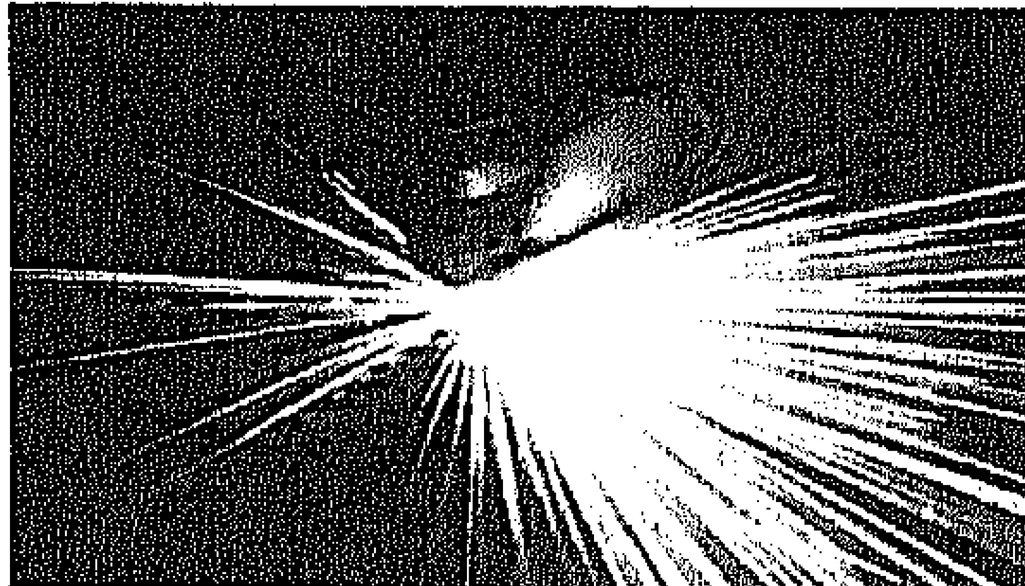
ويوجد أنواع أخرى من الليزرات كليزرات بخار المعادن (metal-vapor lasers) والتي تولد ضوء في النطاق المرئي وفوق البنفسجي منها ليزرات هيليوم-كادميوم وهيليوم-زئبق وهيليوم-فضة وغيرها. وكذلك ليزرات الإلكترون الحر (free electron lasers) والقادرة على توليد ضوء موجات ضمن نطاق يمتد من 100 نانومتر لعدة ملليمترات وتستخدم في التطبيقات الطبية ودراسة مكونات الجو. وكذلك ليزرات الليف الزجاجي (glass fiber lasers) حيث يتم تطعيم قلب الليف بمواد فعالية كالإربيوم وتتم عملية الضخ باستخدام ضوء ليزر آخر ومن أشهر أنواعها مضخم

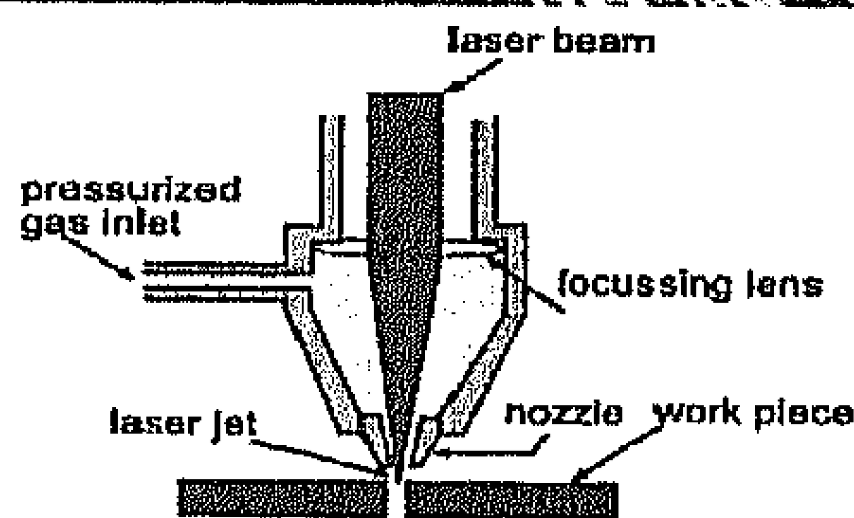
الليف المطعم بالإربيوم (Erbium Doped Fiber Amplifier) وليزر رامان (Raman laser) والتي تولد أطوال أمواج تمتد من 1000 إلى 2000 نانومتر وعادة ما يتم استخدامها كمضخمات للإشارات الضوئية في أنظمة الاتصالات الضوئية.

5-10 استخدامات الليزر

يستخدم الليزر بسبب خصائص ضوئه المميزة في تطبيقات لا حصر لها بدأت منذ اختراعه في عام 1960م. وعادة ما يعتمد التطبيق على خاصية واحدة أو أكثر من خصائص ضوء الليزر التي شرحناها سابقا ولذلك نجد أن لكل تطبيق يوجد أنواع معينة من الليزرات التي تناسبه. فبعض التطبيقات تحتاج لأطوال موجات محددة حيث لا يمكنها العمل على أطوال الموجات الأخرى كما في جراحة العيون وبعضها يحتاج لقدرات ضمن مدى محدد قد تكون منخفضة أو عالية وبعضها يحتاج لعرض شعاع دقيق وأخرى عريض وهكذا الحال مع بقية المواصفات. فأنظمة الاتصالات على سبيل المثال تحتاج لليزرات صغيرة الحجم قليلة القدرة نسبيا وبعرض نطاق ضيق جدا لكي تتمكن من حمل كميات كبيرة من المعلومات. بينما يحتاج قطع المعادن وتشكيلها ليزرات عالية القدرة قد تصل لعشرات الكيلواطات مع شعاع بالغ الدقة ولا يضير ضخامة حجمها ولا عرض نطاقها كذلك. ومن الصعب جدا حصر استخدامات الليزر لكثرتها وسنبين فيما يلي بعض أهم التطبيقات الرئيسية لليزرات.

التطبيقات الصناعية



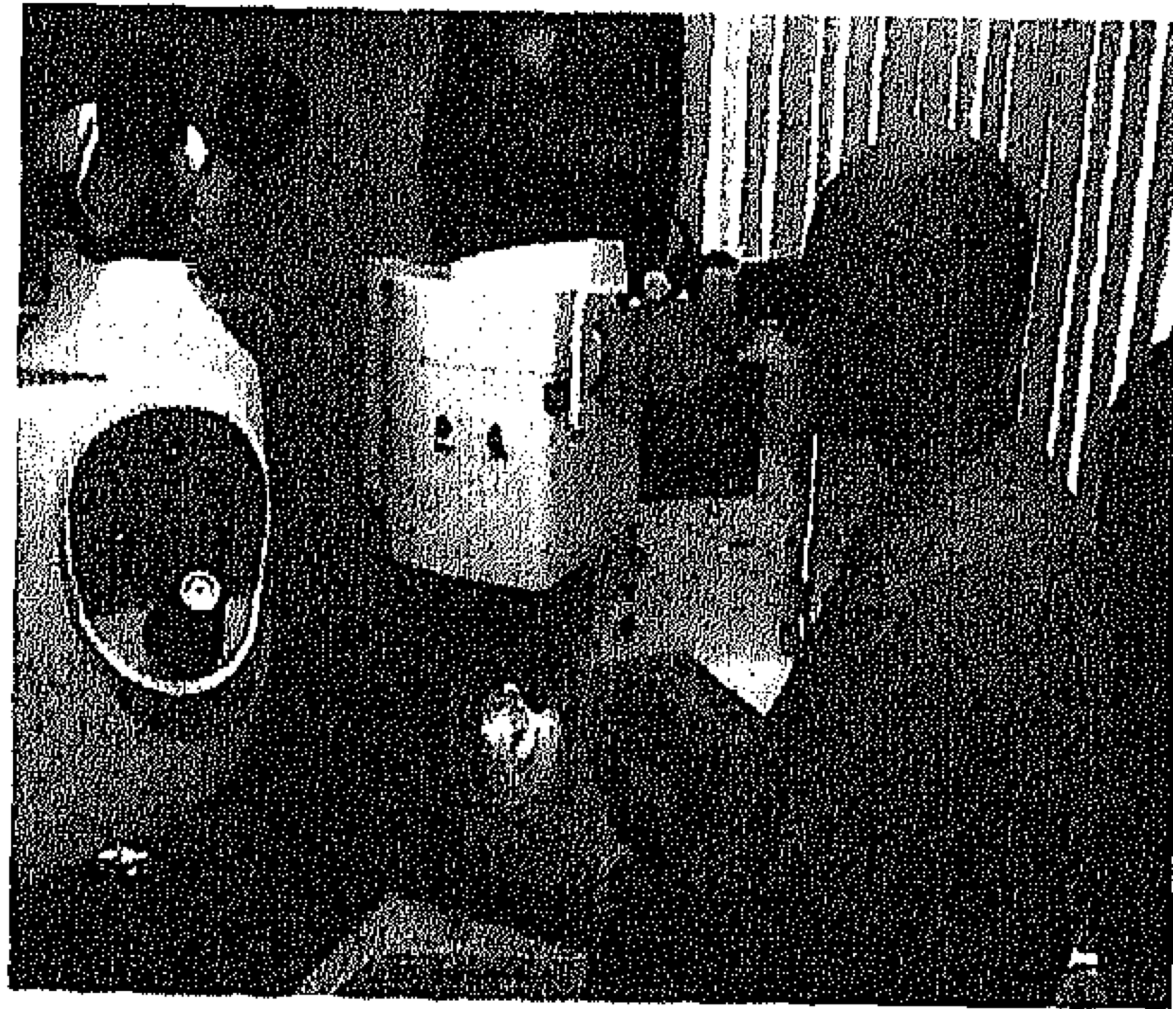


يقوم الليزر بمهام لا حصر لها في قطاع الصناعة حيث يستخدم شعاع الليزر عالي التركيز في قص وقطع الألواح المعدنية والخشبية والبلاستيكية والمطاطية والزجاجية والخزفية وكذلك الورق والقماش بدقة متناهية وبالأشكال المطلوبة وذلك تحت سيطرة الحواسيب والمتحكمات الدقيقة. ويلزم لهذه التطبيقات ليزرات عالية القدرة قد تصل لعشرات الكيلواطات بالإضافة إلى ذلك حاجتها إلى أشعة بالغة الدقة مما يؤدي إلى الحصول على أشعة بالغة التركيز يمكنها إذابة مختلف أنواع المواد بما فيها المعادن. ويلزم الحذر عند استخدام مثل هذه الليزرات من قبل المتعاملين معها حيث أنها في الغالب أشعة غير مرئية وقد تؤدي إلى ضرر بالغ في جسم الإنسان أو بالمعدات المحيطة بمكان العمل. وعادة ما يوجد في مكان العمل تعليمات واضحة وصارمة عند التعامل مع مثل هذه الليزارات ويتم كذلك تدريب العاملين تدريبا جيدا لتفادي إصابات العمل.

وعادة ما يستخدم ليزر ثاني أكسيد الكربون وليزر الياق -نيوديميم (Nd:YAG) في مثل هذه التطبيقات حيث يمكن للنوع الأول توليد قدرات ضوئية قد تصل لعدة كيلوواتات ولكن بشعاع قد يصل قطره لعدة سنتيمترات ولذلك يلزم استخدام العدسات لتركيز هذا الشعاع ليكون قطره بعدة ميكرومترات. فعلى سبيل المثال يمكن لليزر ثاني أكسيد الكربون بقدرة ألف واط أن يقطع لوح حديد بسمك 25 مليمتر بعد تركيز شعاعه باستخدام العدسات. ويستخدم الليزر في عملية لحام مختلف أنواع المعادن دون أن يترك آثار اللحام التي تتركها معدات اللحام التقليدية. ويستخدم كذلك لعمل الثقوب بمختلف المقاسات في مختلف أنواع المعادن مهما بلغت صلابتها وكذلك ثقب الماس الذي لا يمكن لأي مثقب معدني أن يثقبه. ويمكن عمل ثقوب بالغة الصغر باستخدام ليزر الياق – نيوديميم (Nd:YAG) بحيث يصل قطرها إلى عدة ميكرومترات وهذا ما لا يمكن إنجازه بأي أداة غير الليزر. ويستخدم الليزر في صهر وتبخير المعادن في مواضع محددة دون التأثير على المناطق المجاورة وكذلك تشكيل وصنفرة القطع المستخدمة في مختلف أنواع الآلات والأجهزة والمعدات. ويستخدم كذلك في الحفر والكتابة على أسطح مختلف أنواع المواد المعدنية والزجاجية والخزفية وبخطوط متناهية في الصغر. ويستخدم بكثرة في صناعة الإلكترونيات حيث يقوم برسم خطوط الدوائر الإلكترونية على رقائق الدوائر المتكاملة والتي قد يصل عرضها إلى أجزاء من الميكرومتر وكذلك الرسم على الألواح المطبوعة وفي تشكيل العناصر الإلكترونية كالمقاومات والمكثفات والمحاثات. ويستخدم كذلك في خطوط الإنتاج لضبط حركة الأجسام على الأحزمة المتحركة وفي تصنيف المنتجات وكتابة الشيفرات عليها.

التطبيقات الطبية

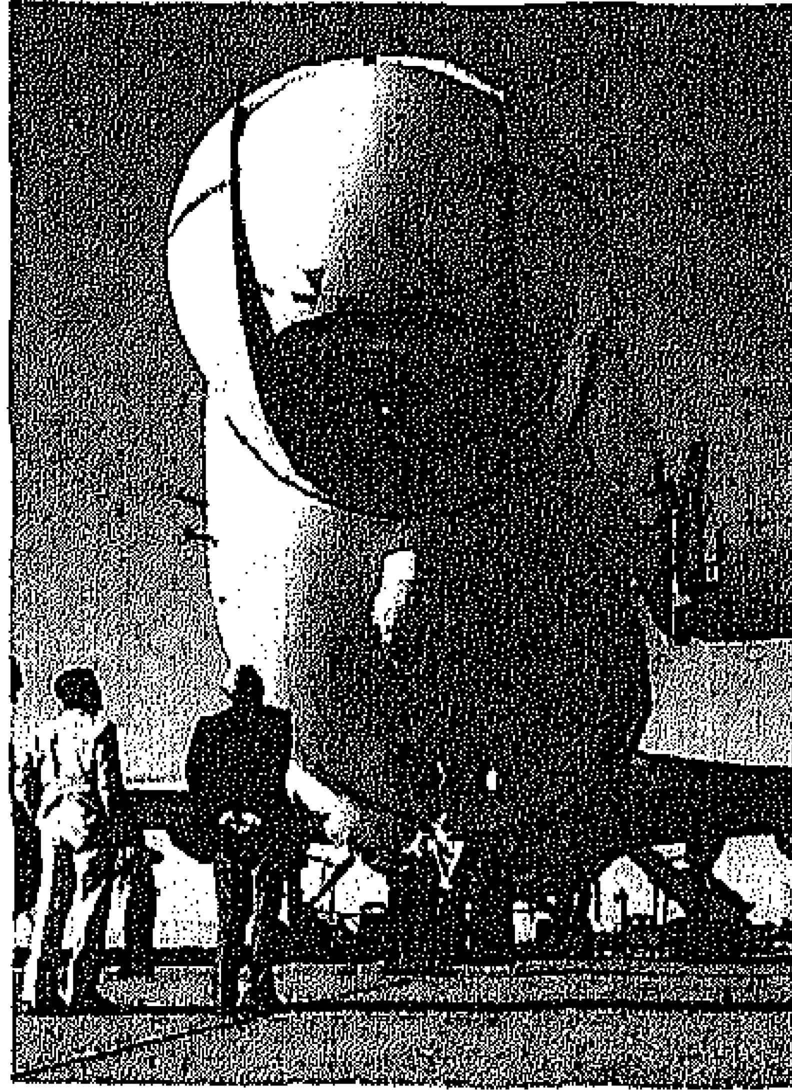
تستخدم أشعة الليزر بمختلف أنواعها في الجراحة وفي مجال طب الأسنان وطب العيون والأمراض الجلدية. ففي مجال طب وجراحة العيون يستخدم الليزر في علاج العتمات السطحية للقرنية وفي علاج العيوب الإنكسارية للعين كقصر النظر وطول النظر والإستجماتيزم وذلك عن طريق العديد من التقنيات أهمها تقنية الليزك (LASIK) وتقنية اللازك (LASEK) وغالبا ما يستخدم ليزر الإكسايمر (Excimer) في هذا النوع من العلاج بسبب قصر طول موجته وصغر قطر شعاعه. وتستخدم كذلك في علاج المياه البيضاء والزرقاء في العين من خلال إجراء ثقوب صغيرة جدا في قزحية العين يعمل على تصريف هذه المياه والتخفيف من ضغط العين. ويستخدم الليزر في علاج أمراض الشبكية الناتجة عن مرض السكري أو غيره من الأمراض كوقف نزيف الشبكية من خلال كي نهايات الأوعية الدموية وكذلك وقف انفصال الشبكية عن الملتحمة من خلال كيها باستخدام ليزر الآرغون. وفي الجراحة يتم استخدام شعاع الليزر كمشرط في العمليات الجراحية حيث يتميز بدقته العالية إلى جانب عدم حدوث أي نزيف في مكان الجرح بسبب قيامه بلحام النهايات الطرفية للشعيرات الدموية ويستخدم كذلك بإزالة الأورام بمختلف أنواعها



من خلال تبخيرها بدلا من استئصالها بالمشرط مما يقلل من الضرر على الأنسجة السليمة المحيطة بها وخاصة في الأعضاء الحساسة كالدماغ والكبد والعيون. ومن أنواع الليزر المستخدمة في هذا المجال ليزر ثاني أكسيد الكربون والأرغون. وفي طب الأسنان يستخدم الليزر لحفر الأسنان بشكل بالغ الدقة وكذلك لتنظيف أسطحها. وفي الأمراض الجلدية يستخدم الليزر لإزالة البثور وحب الشباب والتجاعيد والوحمات والنمش وآثار الحروق والوشم والشعر الزائد وفي معالجة بعض الأمراض الجلدية كالبهاق والصدفية. ويستخدم الليزر في تفتيت حصى الكلى والمرارة وإزالة الأورام في داخل أعضاء جسم الإنسان وذلك من خلال نقل شعاعه بواسطة ألياف زجاجية دقيقة يمكن إدخالها بكل سهولة في التجويفات والمسالك والعروق أو من خلال ثقوب صغيرة يتم فتحها في جلد الجسم.

التطبيقات العسكرية

يستخدم الليزر في التطبيقات العسكرية لأداء مهام مختلفة من أهمها تحديد بعد الهدف بشكل بالغ الدقة ومن ثم تعطى المعلومات لمصادر النيران كالمدافع وقاذفات الصواريخ لإطلاق قذائفها بشكل دقيق نحو الهدف. أما المهمة الثانية فهي في توجيه الصواريخ نحو أهدافها من خلال إضاءة الهدف بضوء ليزر غير مرئي ويستخدم الصاروخ الضوء المنعكس من الهدف في إرشاده نحو الهدف. وعادة ما يتم استخدام ليزر نبضي مشفر ويتم تخزين معدل النبضات والشيفرة في الصاروخ الموجه لكي لا يستجيب لأضواء الليزرات الأخرى.

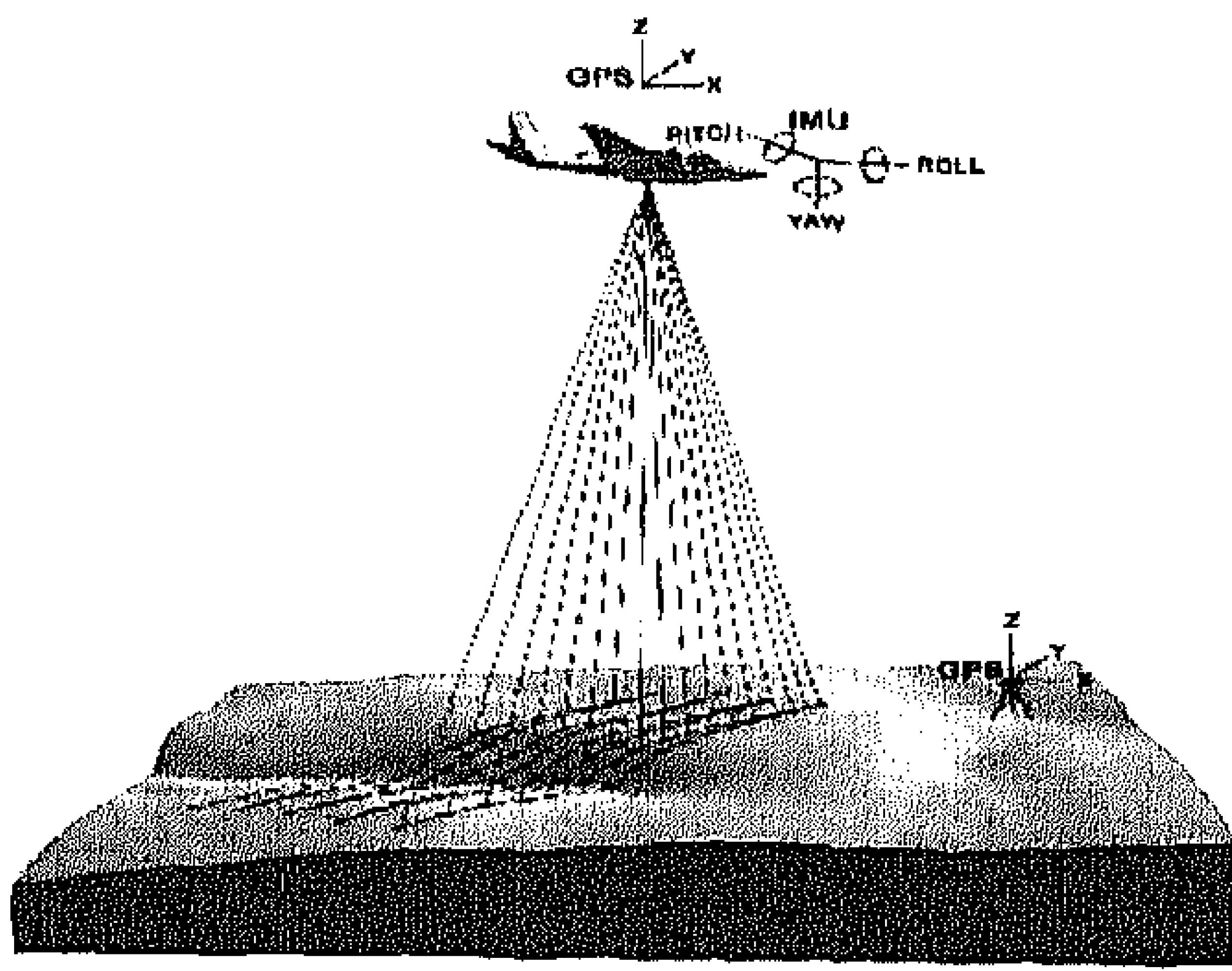


ويستخدم ضوء الليزر لشل حركة المقاتلين المشاة من خلال تسليط الضوء على أعينهم فيصيبهم بالعمى الدائم أو المؤقت وكذلك الدوخان. ويستخدم ضوء الليزر كذلك في التشويش على الأنظمة الإلكترونية وأنظمة الاتصالات من خلال تعطيل بعض المعدات المكشوفة والتي يصعب حمايتها كالهوائيات والكاميرات وغيرها. ويستخدم الليزر كسلاح لتدمير الأهداف حيث تستخدم نبضات الليزر عالية الطاقة في تدمير الأهداف بدلا من القذائف التقليدية والتي تتميز بسرعة وصولها إلى الهدف وهي سرعة الضوء وكذلك عدم حيودها عن مسارها أبدا كما هو الحال مع القذائف التقليدية التي تنحرف عن مسارها نتيجة للجاذبية الأرضية. وتلزم مثل هذه الأسلحة الليزرية لتدمير الأهداف البعيدة وكذلك السريعة كتدمير الصواريخ المختلفة قصيرة وبعيدة المدى والصواريخ العابرة للقارات قبل وصولها لأهدافها. وتستخدم كذلك لتدمير الدبابات والدروع وحاملات الجند والطائرات. ولكن لا زالت طاقة هذه الأسلحة دون المستوى المطلوب خاصة عند ضرب الأهداف البعيدة حيث أن شدة شعاع الليزر تقل مع زيادة المسافة. وغالبا ما تستخدم الليزرات الكيميائية في مثل هذه التطبيقات بسبب طاقتها العالية ولكن وبسبب كبر حجمها وحاجتها لكميات كبيرة من المواد الكيميائية فإنه يلزم استخدام طائرات أو سفن كبيرة الحجم لحمل هذه الليزرات مع المواد الكيميائية اللازمة لتشغيلها كما هو واضح من الصورة المرفقة لطائرة كبيرة الحجم تحمل مثل هذه الليزرات ويتم إطلاق ضوء الليزر من مقدمتها.

الليدار أو رادار الليزر (Lidar or Laser Radar)

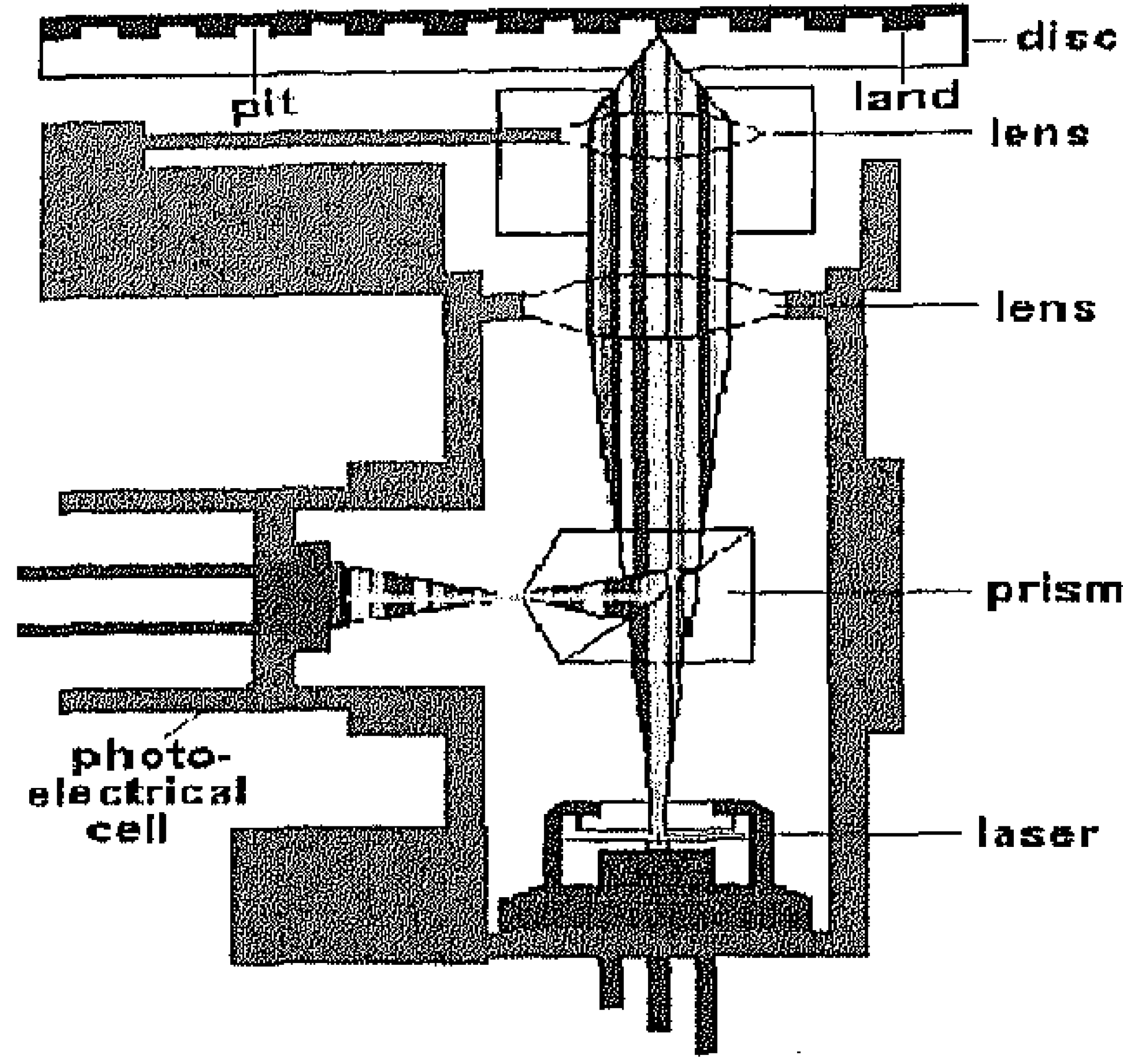
الليدار هو نظير الرادار حيث يستخدم الموجات الضوئية بدلا من موجات الميكروويف في عمله ولذا فقد تم استبدال كلمة الميكروييف بكلمة الضوء في تسميته فأصبحت الجملة على النحو التالي: (Light Detection and Ranging) ويطلق عليه في الغالب اسم رادار الليزر (laser radar) لعدم شيوع كلمة الليدار. وعلى الرغم من أن شعاع الليزر أضيق بكثير من شعاع الميكروويف وبإمكانه أن يعطي قياسات بالغة الدقة عن الهدف إذا ما أصابه إلا أنه لا يقوم مقام الرادار في كثير من التطبيقات وخاصة في كشف الأهداف وذلك لاستحالة مسح كامل الفضاء بشعاع الليزر بسبب أن مقطع شعاعه بالغ الصغر. هذا إلى جانب إلى أن حساسية المستقبلات الضوئية ليست بكفاءة المستقبلات الراديوية حيث تقل عنها بمئات المرات وكذلك صعوبة استخدام هوائيات كبيرة الحجم لجمع أشعة الضوء المنعكس كما هو الحال مع الرادار مما يمنع من استخدامه في كشف الأهداف البعيدة. وبسبب هذه المشاكل في رادار الليزر فقد اقتصر استخدامه في قياس بعد الأهداف بعد أن يتم اكتشافها بالعين المجردة أو بالرادار العادي. يستخدم الليدار في قياس المسافات بدقة متناهية في كثير من التطبيقات كما في أنظمة المساحة وفي كافة أعمال البناء للتأكد من استقامة البناء وتدقيق مد خطوط نقل النفط وبناء الجسور وحفر الأنفاق وفي تحديد بعد الأهداف العسكرية وفي تحديد ارتفاع الطائرات عن سطح الأرض. ويستخدم رادار الليزر بقياس سرعة الأهداف من خلال معالجة زمن وصول النبضات المرتدة عن الهدف كما في الرادارات الحديثة التي تستخدمها الشرطة لمراقبة سرعة المركبات على الطرق. إن أكثر استخدامات رادار الليزر هو في أنظمة الاستشعار عن بعد (remote sensing) حيث يستخدم في رسم الخرائط الطبوغرافية بسبب تفوق دقته في قياس البعد على الرادار العادي خاصة إذا ما تم استخدام طرق التداخل الضوئي (optical interferometry) في عمليات القياس.





تطبيقات أنظمة الاتصالات والمعلومات

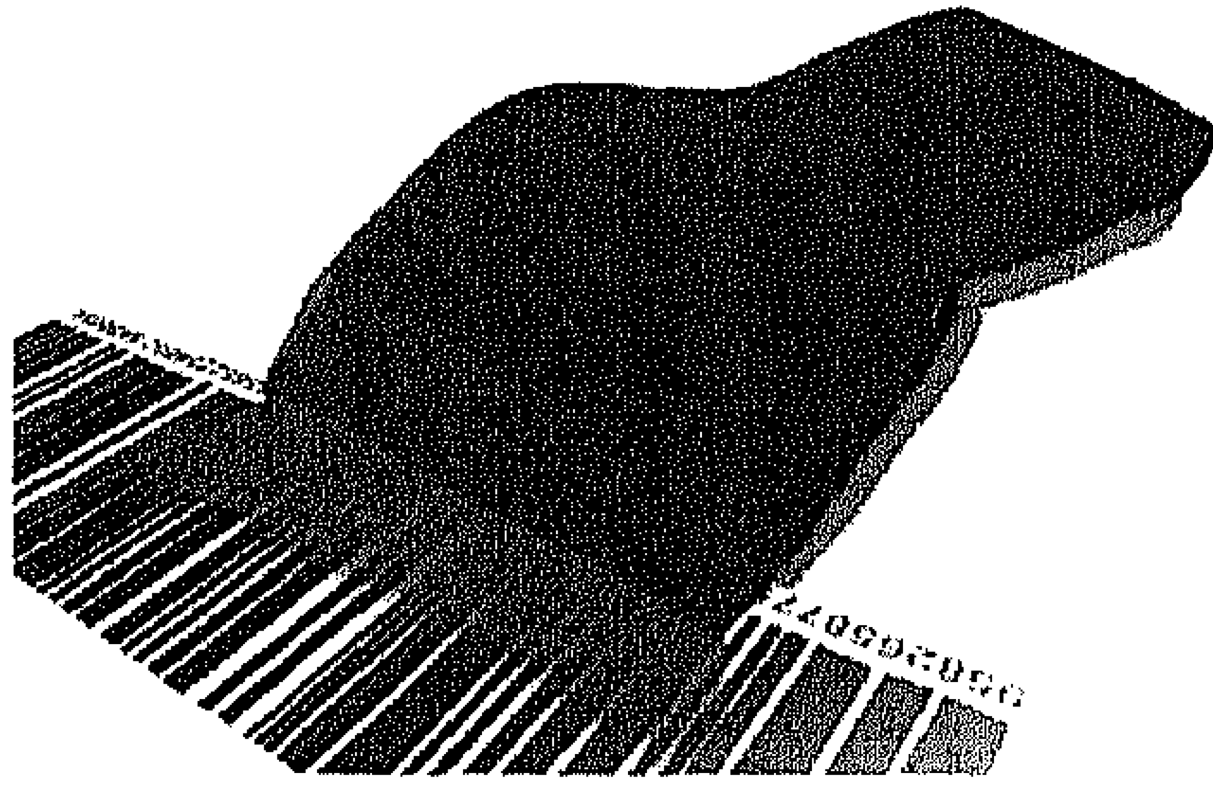
تستخدم الليزرات شبه الموصلة التي تميز بصغر حجمها وقلة استهلاكها بشكل كبير في أجهزة ومعدات أنظمة الاتصالات والمعلومات وقد يكون هذا القطاع أكبر القطاعات استخداما لليزرات. ففي أنظمة اتصالات الألياف الضوئية والتي تعتبر العمود الفقري لشبكات الهواتف والإنترنت يستخدم ضوء الليزر كحامل لمختلف أنواع المعلومات بعد تحويلها إلى الشكل الرقمي حيث يمكن للحامل الضوئي الواحد أن يحمل كمية معلومات تفوق بعشرات الآلاف عن تلك التي يحملها الحامل الراديوي. ويعتبر الليزر شبه الموصل من نوع (InGaAsP) أكثر الليزرات استخداما كمصدر للضوء في هذه الأنظمة حيث يمكن من خلال



التحكم بنسب العناصر المستخدمة فيها الحصول على الطول الموجي المطلوب وذلك ضمن مدى الموجات التي تستخدمها أنظمة اتصالات الألياف الضوئية والتي تقع بين 1000 و 1700 نانومتر. وتستخدم الليزرات شبه الموصلة في الأقراص الضوئية المدمجة وأقراص الفيديو من خلال استخدام شعاع الليزر لكتابة المعلومات الرقمية على أسطحها بكثافة عالية جدا ومن ثم قراءتها. وتستخدم كذلك في طابعات الليزر لتعطي طباعة عالية الجودة وكذلك في أجهزة المسح الضوئي للمستندات والصور وفي الفارات الضوئية وكذلك في الحواسيب الضوئية التي تستخدم الضوء بدلا من الكهرباء لمعالجة وتخزين المعلومات والتي لا زالت قيد التجربة.

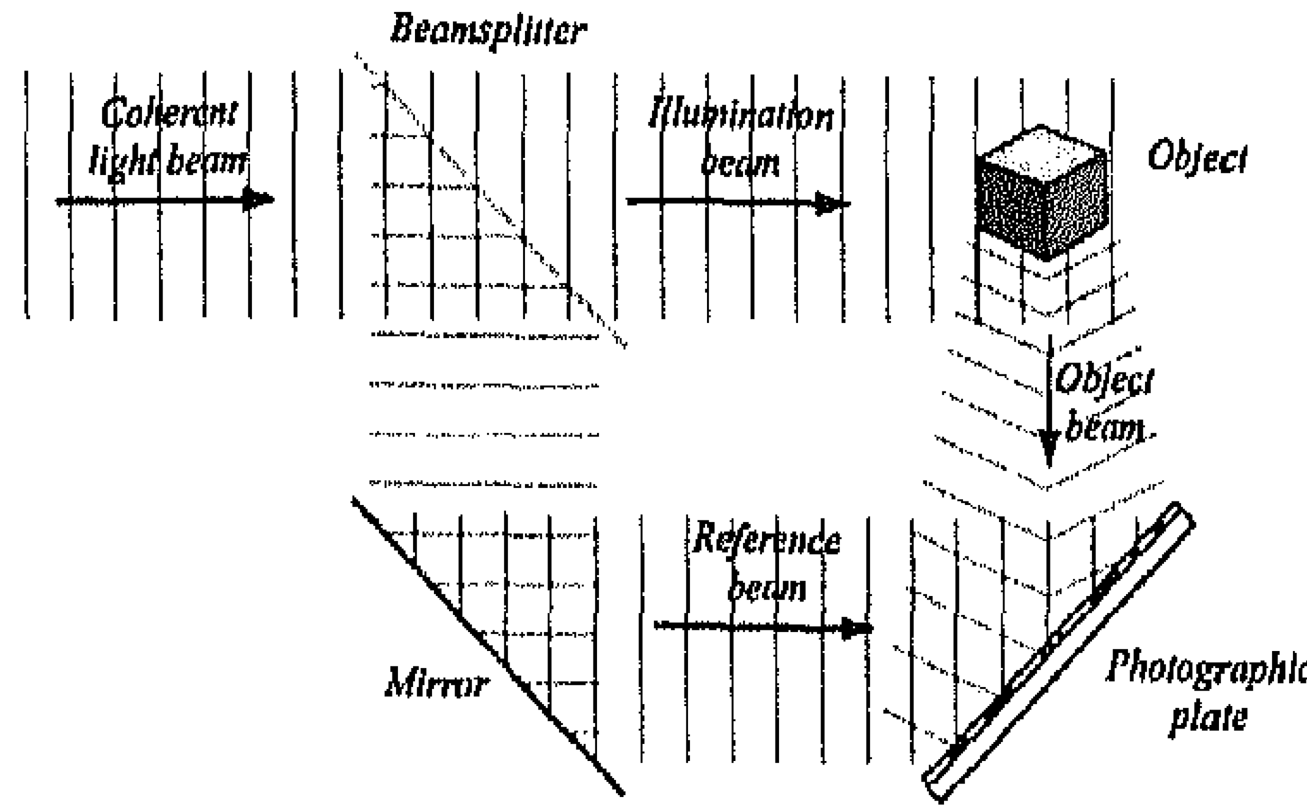
قارئات الشيفرات الخطية (Barcode Readers)

تستخدم أشعة الليزر في أنظمة قارئات الشيفرة الخطية حيث يتم في هذه الأنظمة تحويل الرقم التعريفي (identification number) لمختلف السلع إلى شيفرات يتم رسمها على شكل خطوط متوازية بكثافة متغيرة يتم تثبيتها على السلعة. ويتم قراءة هذه الشيفرات باستخدام ضوء الليزر حيث يقوم شعاع الليزر بمسح الشيفرات ومن ثم التقاط الضوء المنعكس بكاشفات ضوئية (photodetectors) تقوم بتحويل الشيفرات إلى سلسلة من النبضات الكهربائية التي يتم إرسالها إلى الحاسوب ليتعرف من خلال برامج مخزنة عليه على نوع السلعة وكل ما يتعلق بها من معلومات. ولقد تم استخدام هذه الأنظمة في تطبيقات لا حصر لها سهلت بشكل كبير جدا التعامل مع الكميات الهائلة من السلع التي يتم إنتاجها يوميا في المصانع والمطابع والمزارع. ففي المحال التجارية تستخدم هذه الأنظمة لقراءة الشيفرات المثبتة على السلع لتحديد السعر عند البيع حيث يقوم المحاسب بتمرير الماسح الضوئي على الشيفرة المثبتة على السلعة فيقوم الحاسوب على الفور بتحديد نوع السلعة وثمنها وكتابتها في الفاتورة وعند الانتهاء من مسح جميع سلع المشتري يقوم الحاسوب بإعطاء الأمر للطابعة لطباعة نسخة منها للمشتري. ويمكن للمشتري أن يحس بمدى التوفير في الوقت من خلال استخدام هذا النظام عندما يفشل القارئ الضوئي في قراءة الشيفرة فيضطر المحاسب لإدخال رقم السلعة بشكل يدوي إلى الحاسوب. وفي مكاتب البريد يتم استخدام هذا النظام لفرز آلاف الرسائل البريدية بشكل سريع ودقيق لتصل إلى عناوينها دون أخطاء تذكر. وفي البنوك يستخدم لقراءة أرقام الشيكات والحوالات والمعاملات المالية وإدخالها إلى الحواسيب بشكل دقيق. وفي المكتبات العامة يتم استخدامه لتصنيف الكتب وإعارتها بشكل محوسب لا مجال للخطأ فيه. وفي المطارات يتم استخدامه للتعرف على حقائب المسافرين وفرزها ونقلها وتوزيعها بين المطارات التي تمر بها بشكل دقيق.

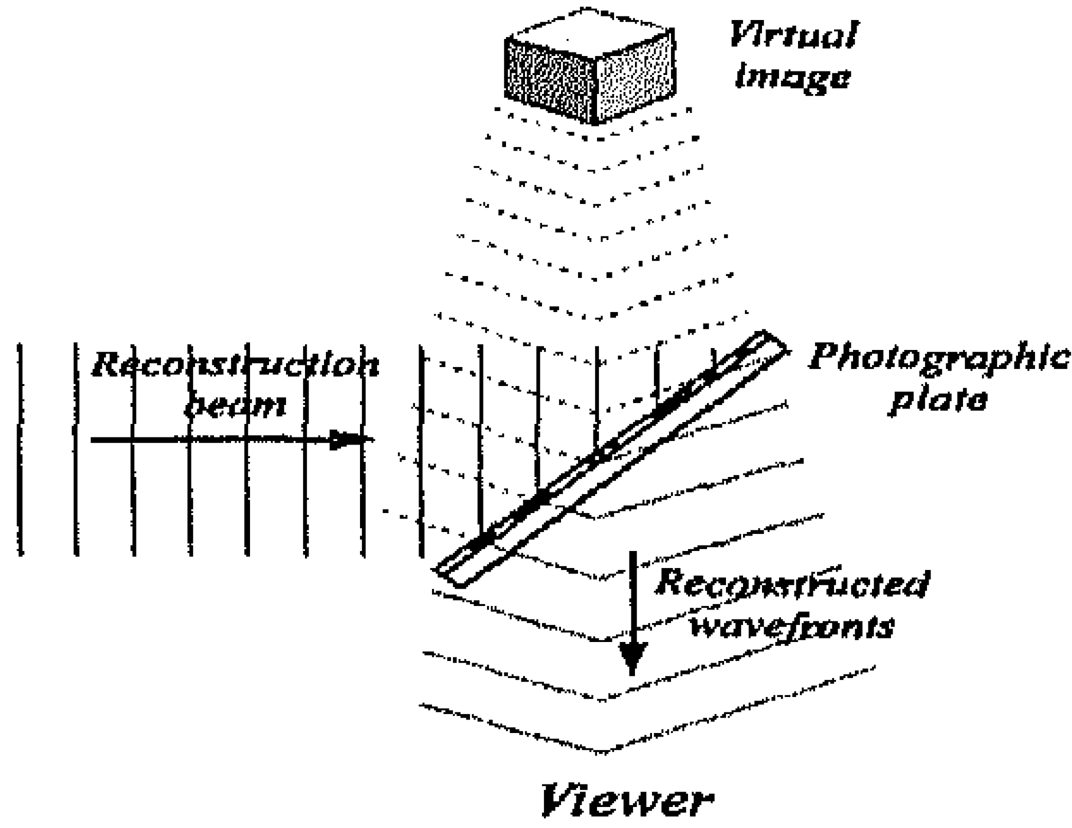


التصوير المجسم (Holography)

يستخدم ضوء الليزر في إنتاج ما يسمى بالصور المجسمة أو الصور ثلاثية الأبعاد (Holograms) وهي الصور التي تتغير محتوياتها مع تغير زاوية النظر وذلك على العكس من الصور ثنائية الأبعاد التي لا تتغير محتويات الصورة بتغير زاوية النظر.



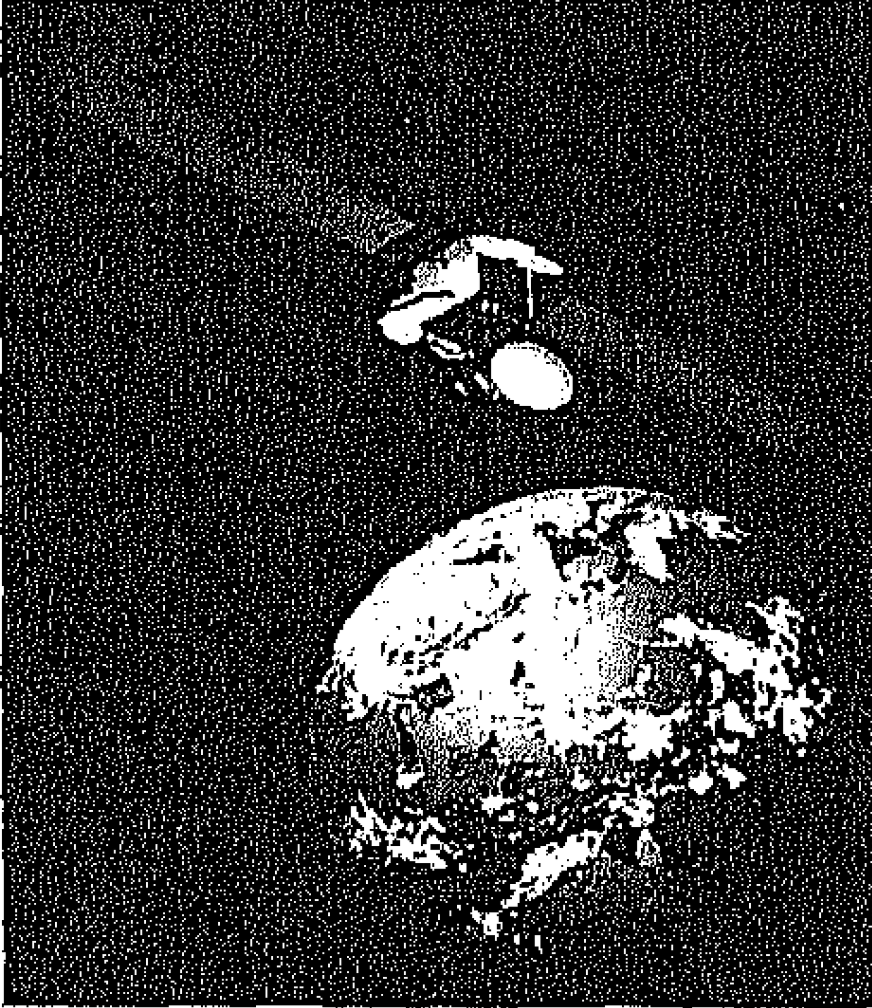
وتختلف الطريقة التي تبنى من خلالها الصور ثلاثية الأبعاد عن تلك في الصور ثنائية الأبعاد حيث لا تلزم العدسات لبناء الصور المجسمة ولكنها في المقابل تحتاج لإضاءة الجسم المراد تصويره بضوء مترابط (coherent light) كضوء الذي يولده الليزر بينما يستخدم الضوء العادي في التصوير ثنائي الأبعاد. ويتم إنتاج الصور المجسمة من خلال تقسيم ضوء الليزر إلى حزمتين حزمة مرجعية يتم تسليطها مباشرة على لوح أو فيلم التصوير أما الحزمة الثانية فيتم تسليطها على الجسم من اتجاهات مختلفة وعندما تسقط الأشعة المنعكسة عن الجسم على فيلم التصوير مباشرة بدون الحاجة للعدسات فإنها تتداخل مع أشعة الحزمة المرجعية لتشكل أنماط تداخلية (interference pattern) تحمل في طياتها معلومات عن صورة الجسم من الاتجاهات المختلفة. ويمكن مشاهدة الصورة المجسمة على الفلم من خلال تسليط ضوء مترابط بنفس طول الموجة للضوء الذي تم به التصوير. وتستخدم الصور المجسمة في تطبيقات كثيرة من أهمها تخزين المعلومات بكثافات عالية جدا على الأقراص المدمجة والتي قد تصل إلى الف جيقابايت أو يزيد. وتستخدم كذلك في الأوراق النقدية والبطاقات الإئتمانية لمنع تزويرها حيث أن إنتاج الصور المجسمة التي توضع عليها لا يمكن إنتاجها إلا من خلال أجهزة معقدة ومكلفة. وتستخدم كذلك في الحواسيب الضوئية ومعالجة الإشارات وفي تحديد المسافات وقياس الأحجام وفي عروض الإعلانات والأعمال الفنية والمجوهرات.وإلى جانب هذه الاستخدامات الرئيسية يوجد استخدامات أخرى لليزرات لا حصر لها حيث تستخدم أضواء الليزر الملونة في ألعاب وعروض الليزر من خلال رسم مختلف الرسومات والصور في الجو وعلى أسطح البنايات. وفي أبحاث الطاقة النووية يستخدم العلماء الليزرات لتوليد درجة الحرارة اللازمة لإحداث الاندماج النووي المحكوم وذلك من خلال تسليط أشعة عدد كبير من الليزر القوية على وعاء صغير جدا يحوي على كمية من الهيدروجين بحيث تصل درجة حرارته إلى ملايين الدرجات مما يؤدي إلى اندماج ذرات الهيدروجين لتنتج ذرات الهيليوم مع تحرير طاقة هائلة. وفي الجيولوجيا تستخدم أشعة الليزر لكشف الحركات الأرضية البالغة الصغر للتنبؤ بالزلازل. ويستخدم ضوء الليزر لقياس مستوى التلوث في الجو وتستخدم الجيروسكوبات الليزرية بدلا من التقليدية في تحديد الاتجاه في السفن والطائرات .



الفصل الحادي عشر

الأقمار الصناعية

11-1 تمهيد



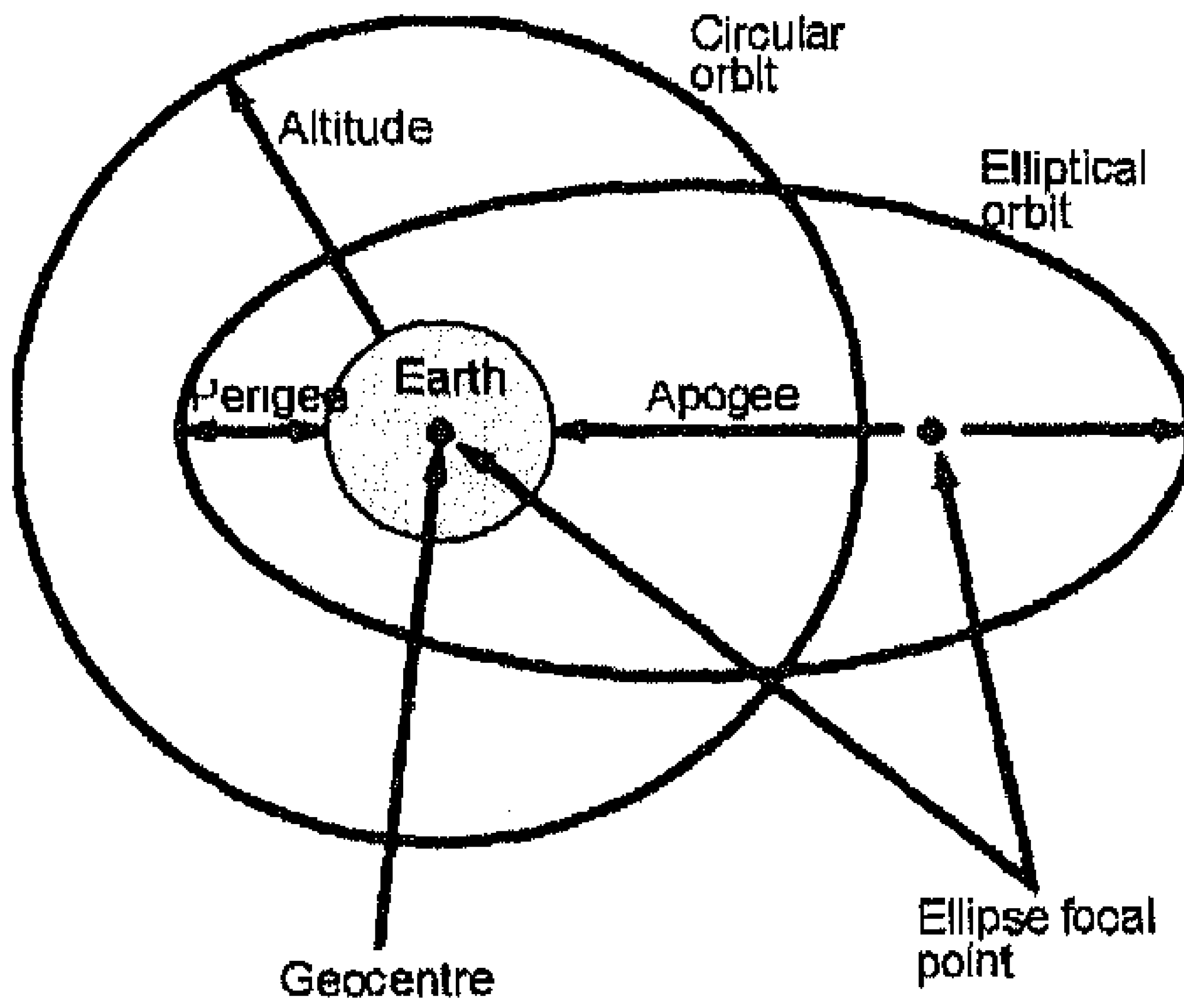
لم يكن ليخطر على بال البشر مدى الفائـدة التـي سـتعود عليهم من خلال وضع أقمار صناعية تـدور فـي مـدارات حـول الأرض. فهاهم بعد مرور ما يزيد عن خمسين عام من إطـلاق أول قمر صناعي ينعمون بتطبيقات بالغة الأهمية لا حصر لها. فقد مكنتهم هذه الأقمار من التحدث مع بعضهم البعض بـالهواتف رغـم تباعـد المسافات بينهم فحطمت بذلك الحواجز الطبيعية كالمحيطات والبحـار والصحارى وسلاسل الجبال الشاهقة. ومكنتهم كذلك من نقل الأخبـار بالصوت والصورة لأي حدث يجري في أي مكان على سطح الكـرة الأرضية إما بشكل مباشر أو غير مباشر. ومكنتهم من مشاهدة برامج آلاف المحطات التلفزيونية التي تقوم ببث برامجها إلى الأقمار الصناعية فتقوم هذه بدورها ببثها إلى أي مكان في العالم فتلتقط إشاراتها من قبل المستخدمين بمعدات رخيصة الثمن. ومكنتهم هذه الأقمار من جمع كميـات ضخمة من الصور والبيانات عن الحالة الجوية في مختلف مناطق العالم فيتم إرسالها إلـى دوائـر الرصـد الجوي التي تقوم بمعالجتها وتوزيعها على الجهات المعنية لأخذ الاحتياطات اللازمـة لمواجهـة الظـروف الجوية والتقليل من عواقب الكوارث الطبيعية وحوادث الطائرات والسفن والقطارات والمركبات.

وبفضل الأقمار الصناعية أصبح تحديد الموقع يتم بدقة متناهية باستخدام نظام تحديد الموقع العالمي الذي يحدد خط الطول وخط العرض والارتفاع لأي مكان على سطح الكرة الأرضية واستخدم هذا النظـام لهداية السفن والطائرات والمركبات للوصول إلى وجهاتها. وتقوم هذه الأقمار بأخذ الصور الفضائية العاديـة والرادارية وتحت الحمراء لرسم خرائط أكثر دقة للتضاريس الأرضية وكذلك لاكتشاف ثروات الأرض مـن معادن ومياه جوفية وبترول وغاز ولمتابعة زحف الصحراء وذوبان الثلوج وحرائق الغابات ورصد الـزلازل والبراكين ولمكافحة الآفات الزراعية ولاكتشاف الآثار ولتخطيط المدن وإلى غير ذلك من التطبيقات التـي لا حصر لها. ويستخدم العلماء بمختلف تخصصاتهم العلمية الأقمار الصناعية لدراسة مختلف أجرام هذا الكـون وعلى وجه الخصوص الأرض التي يعيشون عليها فمن من الفضاء الخارجي يمكن مشاهدة الأرض ودراسـة تضاريسها وجوها بشكل أفضل وأشمل ويمكن كذلك دراسة أجرام الكون بشكل أدق حيـث أن جـو الأرض وطبقة الأينوسفير تمتص جزءا كبيرا من الموجات الكهرومغناطيسية والجسيمات الذرية القادمة من الفضـاء الخارجي مما يترتب عليه خسارة كبيرة في المعلومات التي تحملها هذه الموجات والجسيمات عن الكون. أمـا استخدام الأقمار الصناعية في التطبيقات العسكرية فإنها لا حصر لهـا كالتجسـس علـى الأعـداء وتوجيـه الصواريخ والطائرات الحربية نحو أهدافها والإنذار المبكر من الصواريخ والطائرات القادمة لضرب الأهداف وغير ذلك.

إن أول من اقترح فكرة وضع أقمار صناعية في مدارات حول الأرض هو كاتب الخيال العلمي الأمريكي "أرثر كلارك" وذلك في عام 1945م كحل لمشكلة المكالمات الهاتفية فيما بين القارات. إن أصعب خطوة في عملية وضع قمر صناعي في مدار حول الأرض هو توفير وسيلة نقل مناسبة وطاقة كافية لرفعه من سطح الأرض ووضعه ومن ثم دفعه بالسرعة المناسبة في هذا المدار. وإذا ما تم وضع القمر في المدار المطلوب وبالسرعة المناسبة فإنه سيبقى يدور فيه من ناحية نظرية إلى الأبد دون الحاجة إلى أية طاقة جديدة لدفعه ويكون حاله كحال قمر الأرض الطبيعي الذي يدور في مداره حول الأرض منذ عدة بلايين من السنين. وبفضل سباق التسلح بين الدول العظمى وخاصة في مجال تقنية الصواريخ الحربية التي بدأت مع بداية الحرب العالمية الثانية فقد تم صناعة صواريخ يمكنها الإفلات من نطاق الجاذبية الأرضية والدوران حول الأرض. فقد تمكن الاتحاد السوفيتي في الرابع من تشرين أول من عام 1957م من وضع أول قمر صناعي (سبوتنيك 1) في مدار أرضي منخفض وبعد أربعة أشهر فقط وفي الأول من شباط من عام 1958م وضعت الولايات الأمريكية المتحدة قمرها الصناعي الأول (إكسبلورر1) في مدار أرضي منخفض ومن ثم بدأ سباق محموم بين الدولتين العظميين في مجال غزو الفضاء واستخدام الأقمار الصناعية في شتى الأغراض العسكرية والمدنية والعلمية. ففي مجال الاتصالات أطلقت أمريكا في عام 1962م أول قمر صناعي غير متزامن لأغراض الاتصالات وهو تيليستار-1 أتبعته في عام 1963م بقمر صناعي متزامن للاتصالات (سينكوم2) بينما أطلق الروس قمرهم الصناعي غير المتزامن لأغراض الاتصالات مولينيا-1 في عام 1965م. وفي مجال الأرصاد الجوية تم في عام 1961م إطلاق أول قمر صناعي وهو تيروس-1 وذلك لأغراض التنبؤات الجوية حيث تقوم مثل هذه الأقمار بتصوير حركة السحب والأعاصير والعواصف في مختلف مناطق العالم واستخدام هذه المعلومات لإصدار النشرات الجوية. وفي عام 1964م تم إطلاق القمر الصناعي ترانست لأغراض الملاحة حيث تساعد مثل هذه الأقمار الطائرات والسفن إلى الاهتداء إلى مساراتها الصحيحة.

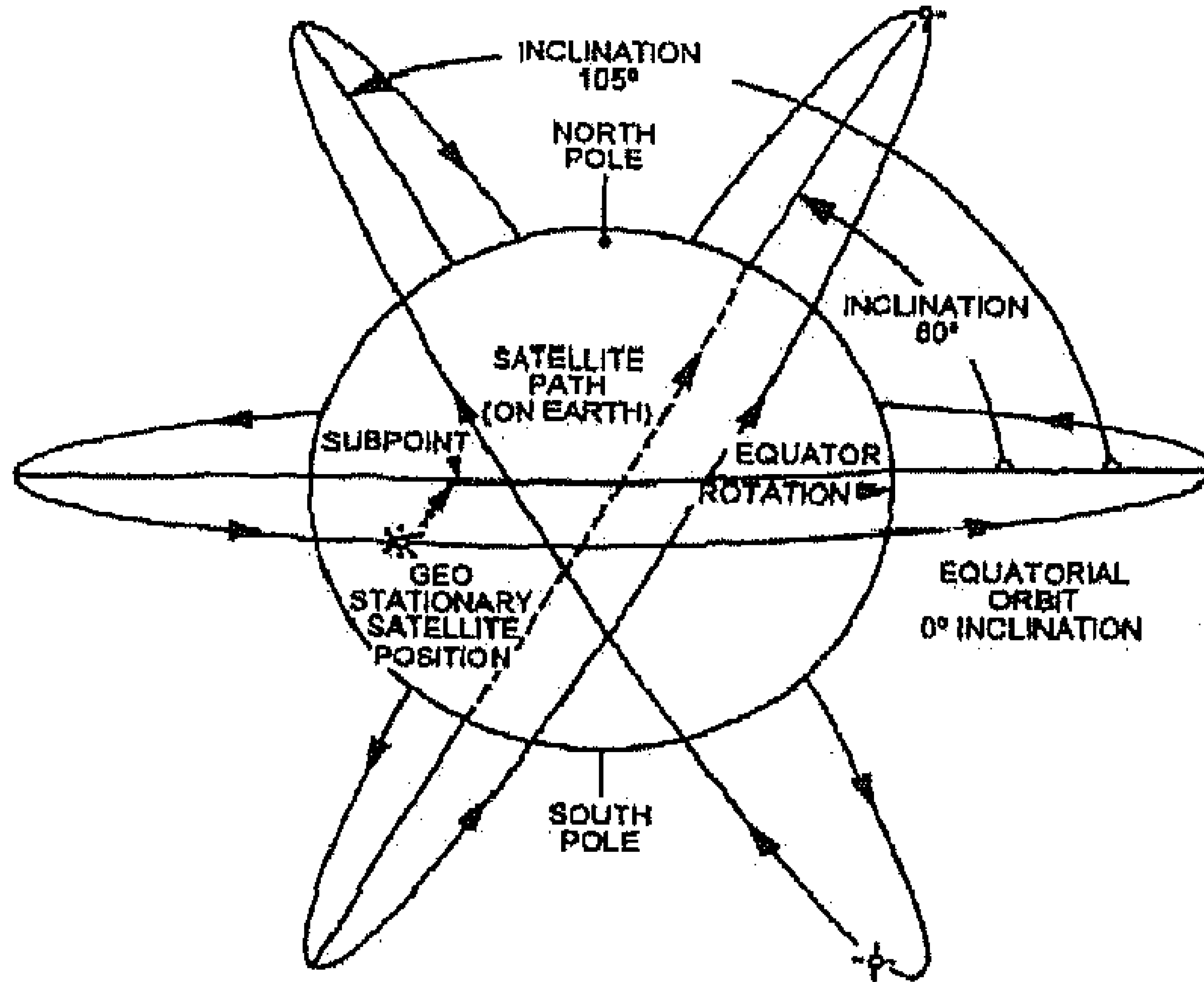
2-11 أنواع المدارات (Orbits)

لا تشذ الأقمار الصناعية عن بقية الأجرام السماوية من حيث أن القاعدة التي تحكم بقاء جرم بجوار جرم آخر هو قوله تعالى "وكل في فلك يسبحون". فلا يوجد في هذا الكون جرم ساكن لا يتحرك حيث أنه سينجذب بمجرد سكونه إلى أقرب الأجرام إليه ويتحد معه ولذلك نجد أن القمر يدور حول الأرض ليبقى في جوارها والأرض وبقية الكواكب تدور حول الشمس لتبقى بقربها والمجموعة الشمسية وكذلك بقية نجوم مجرة درب التبانة تدور حول مركز المجرة. وإذا ما تم وضع قمر صناعي في المدار المطلوب وبالسرعة المناسبة فإنه سيبقى يدور فيه إلى الأبد دون الحاجة إلى أية طاقة جديدة لدفعه وهذا على فرض غياب أي مؤثرات خارجية عليه ويكون حاله كحال قمر الأرض الطبيعي الذي يدور في مداره حول الأرض منذ عدة بلايين من السنين. والسبب وراء



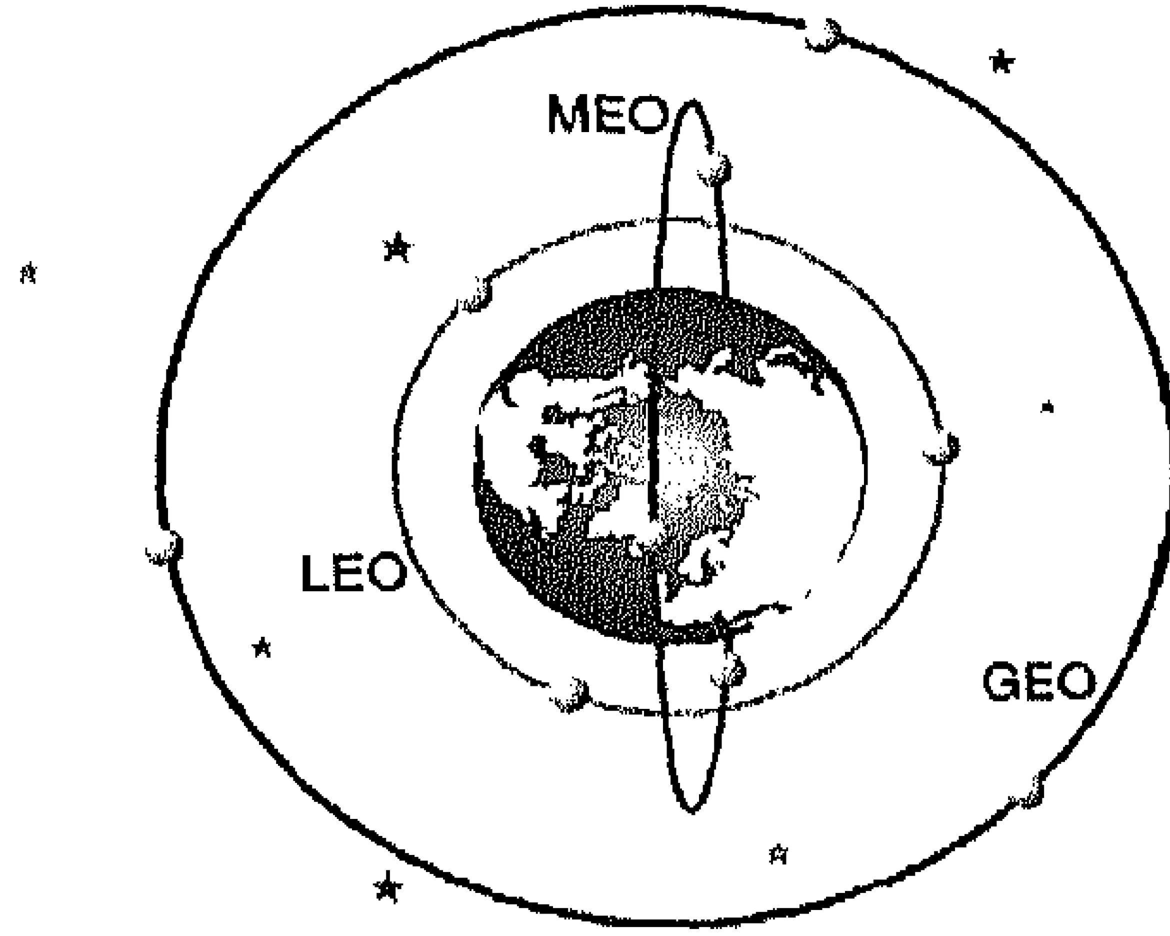
استقرار القمر الصناعي معلقا في مداره فوق الأرض هو تساوي قوة الطرد المركزي الناتجة عن حركته الدائرية مع قوة الجاذبية الأرضية عليه. وتتناسب قوة الجاذبية طرديا مع حاصل ضرب كتلة الأرض بكتلة القمر الصناعي وعكسيا مع مربع المسافة بينهما بينما تتناسب القوة الطاردة طرديا مع حاصل ضرب كتلة القمر بمربع السرعة الخطية له وعكسيا مع المسافة بين القمر والأرض. وعند مساواة القوتين فإن كتلة القمر ستختصر من طرفي المعادلة وعليه فإن سرعة القمر الصناعي ستتناسب عكسيا مع الجذر التربيعي للمسافة بينه وبين الأرض بغض النظر عن مقدار كتلته. ولذلك نجد أن الأقمار ذات المدارات المنخفضة تدور بسرعات أعلى وتكمل دورتها حول الأرض في فترات أقصر من تلك الموضوعة في المدارات العالية. فعلى سبيل المثال فإن سرعة القمر الصناعي في مدار على ارتفاع 500 كيلومتر عن سطح الأرض تبلغ 27000 كيلومتر في الساعة ويكمل دورته حول الأرض في ساعة ونصف تقريبا بينما تبلغ سرعة القمر الصناعي في مدار على ارتفاع 36000 كيلومتر عن سطح البحر 11000 كيلومتر في الساعة ويكمل دورته حول الأرض في 24 ساعة.

ويمكن تصنيف مدارات الأقمار الصناعية تبعا لعوامل مختلفة فمن حيث شكل المدار يوجد نوعين من المدارت وهي المدارات الدائرية (circular orbits) والتي تقع الأرض في مركز الدائرة والمدارات البيضاوية أو الإهليجية (elliptical orbits) حيث تقع الأرض في أحد مركزي الإهليج وتسمى النقطة التي يكون فيها القمر أقرب ما يكون للأرض بنقطة الحضيض (pergee) أما الأبعد فتسمى بنقطة الأوج (apogee). أما تصنيفها من حيث الزاوية الواقعة بين مستوى المدار مع مستوى خط الأستواء فيوجد ثلاثة أنواع وهي المدارات الاستوائية (equatorial orbits) والتي يتطابق فيها المستويان أي أن القمر الصناعي يقع تماما فوق خط الاستواء طوال الوقت والمدارات القطبية (polar orbits) والتي يتعامد فيها المستويان وفي هذه المدارات يمر القمر من فوق قطبي الأرض مرة في كل دورة والمدارات المائلة (inclined orbits) والتي يوجد زاوية بين المستويين تتراوح قيمتها بين صفر و 180 درجة ويستثنى منها زاوية الصفر و 180 وهي زاوية المدارات الإستوائية وزاوية 90 وهي زاوية المدارات القطبية. وأما تصنيفها من حيث ارتفاعها عن سطح الأرض فإنه من حيث المبدأ يمكن وضع القمر الصناعي على أي ارتفاع فوق سطح الأرض إلا أنه يوجد بعض الارتفاعات التي يجب تجنبها وهي منطقة الغلاف الجوي (أقل من 500 كيلومتر) وذلك لتفادي احتراق القمر بسبب احتكاكه مع الهواء نتيجة لسرعته الهائلة في مثل هذه المدارات المنخفضة ومنطقة حزام إشعاعات فان ألن (Van Allen Radiation Belt) (بين ألفين وعشرة آلاف كيلومتر) لتجنب الإشعاعات الضارة بالخلايا الشمسية وأجهزة الاتصالات. وعليه فإنه يوجد ثلاثة أنواع من المدارات من حيث الارتفاع وهي المدارات المنخفضة ((low earth orbits(LEO)) وتقع بين 500 و 2000 كيلومتر والمدارات المتوسطة ((medium earth orbits(MEO)) وتقع بين 10000 و

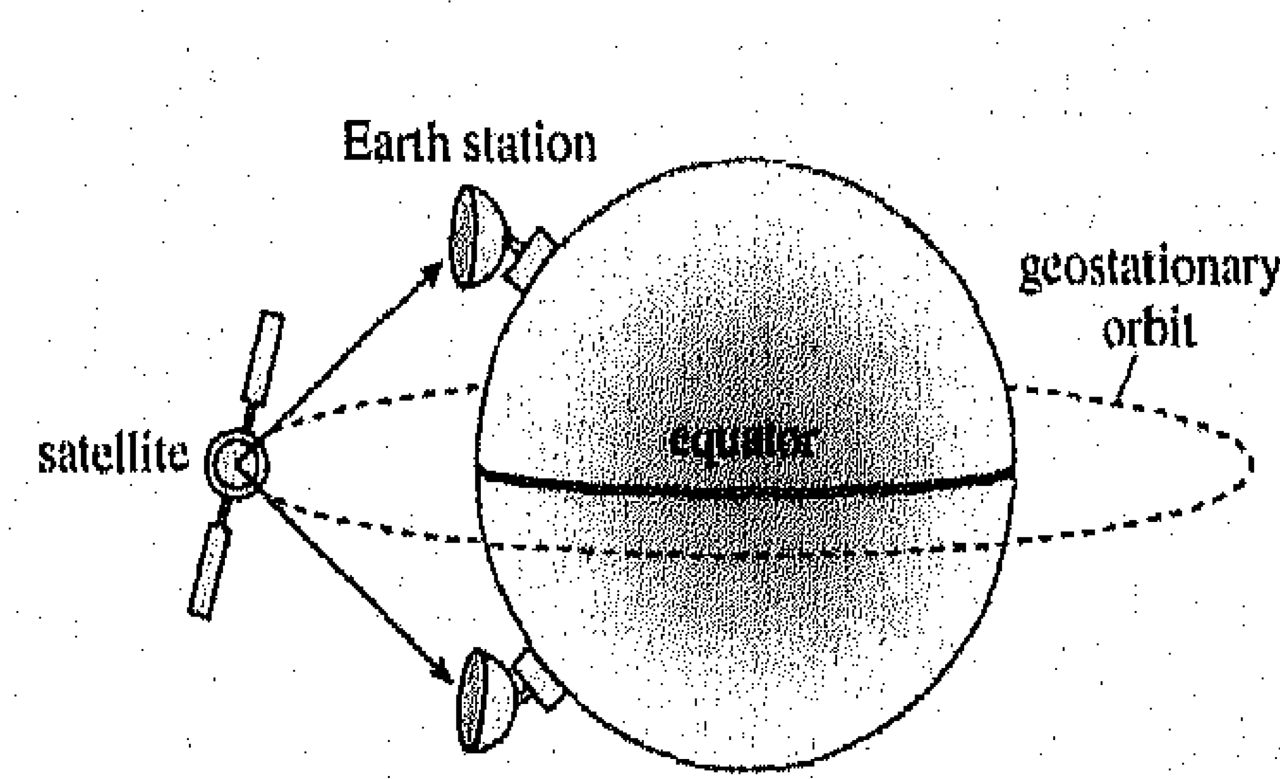


20000 كيلومتر والمدارات المتزامنة (geosynchronous orbits(GEO)) وهي على ارتفاع 36000 كيلومتر تقريبا.

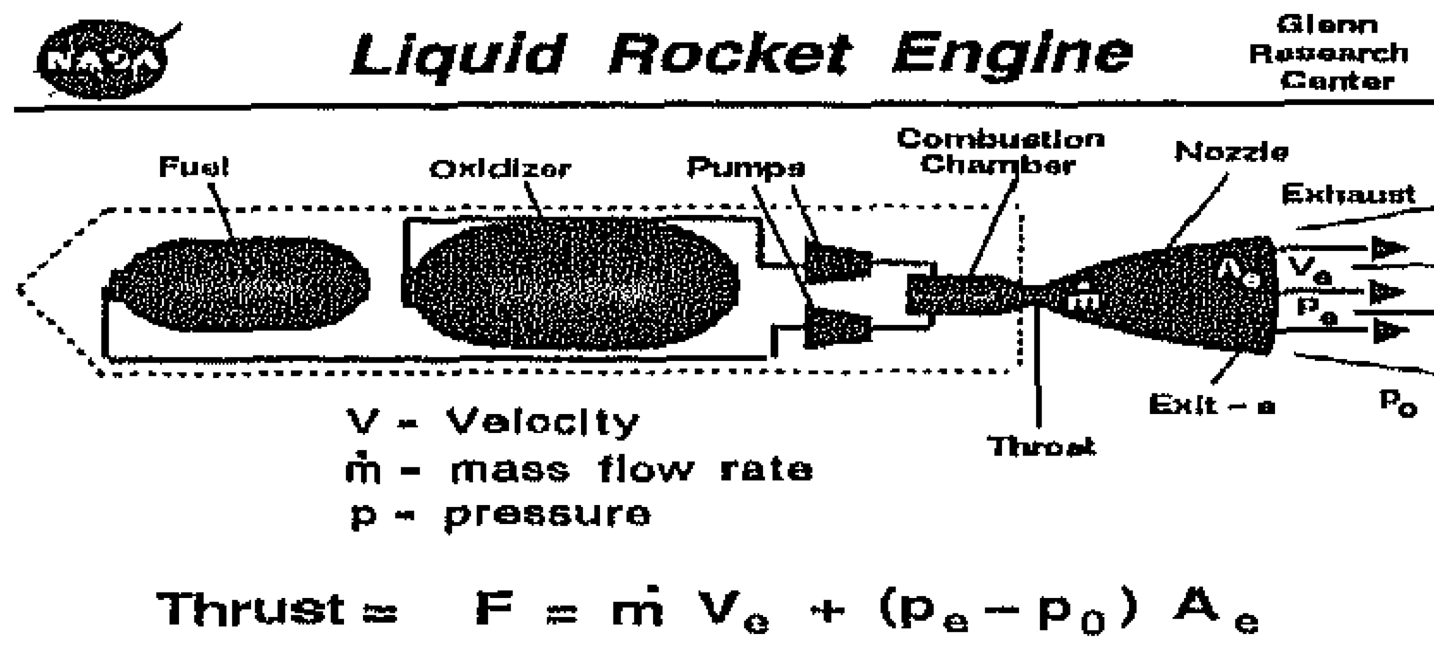
ومن بين عدد لا يحصى من هذه المدارات التي يمكن وضع القمر فيها حول الأرض هنالك مدار وحيد فريد (unique orbit) يبدو فيه القمر الصناعي ثابتا لمن يشاهده من على سطح الأرض ويعود السبب في ذلك إلى تساوي السرعة الزاوية (angular velocity) لدوران القمر في هذا المدار مع السرعة الزاوية لدوران الأرض حول محورها والتي تدور دورة كاملة في 24 ساعة. ويطلق اسم المدار المتزامن مع الأرض (geosynchronous or geostationary orbit) على هذا المدار وذلك لتزامن دورانه مع دوران الأرض وهو مدار دائري يقع تماما فوق خط الاستواء وعلى ارتفاع 36000 كيلومتر عن سطح البحر تقريبا. ويعتبر المدار المتزامن من أنسب المدارات للأقمار الصناعية المستخدمة لأغراض أنظمة الاتصالات والبث التلفزيوني المباشر وذلك لثبات موقعه بالنسبة للمنطقة المقابلة له من الأرض مما يترتب عليه استخدام هوائيات ثابتة التوجيه في المحطات الأرضية. وتبلغ المساحة القصوى التي يمكن للقمر المتزامن تغطيتها 40 بالمائة من مساحة سطح الأرض وتكفي في هذه الحالة ثلاثة أقمار متزامنة لتغطية جميع سطح الأرض باستثناء مساحة صغيرة تقع حول القطبين الشمالي والجنوبي.



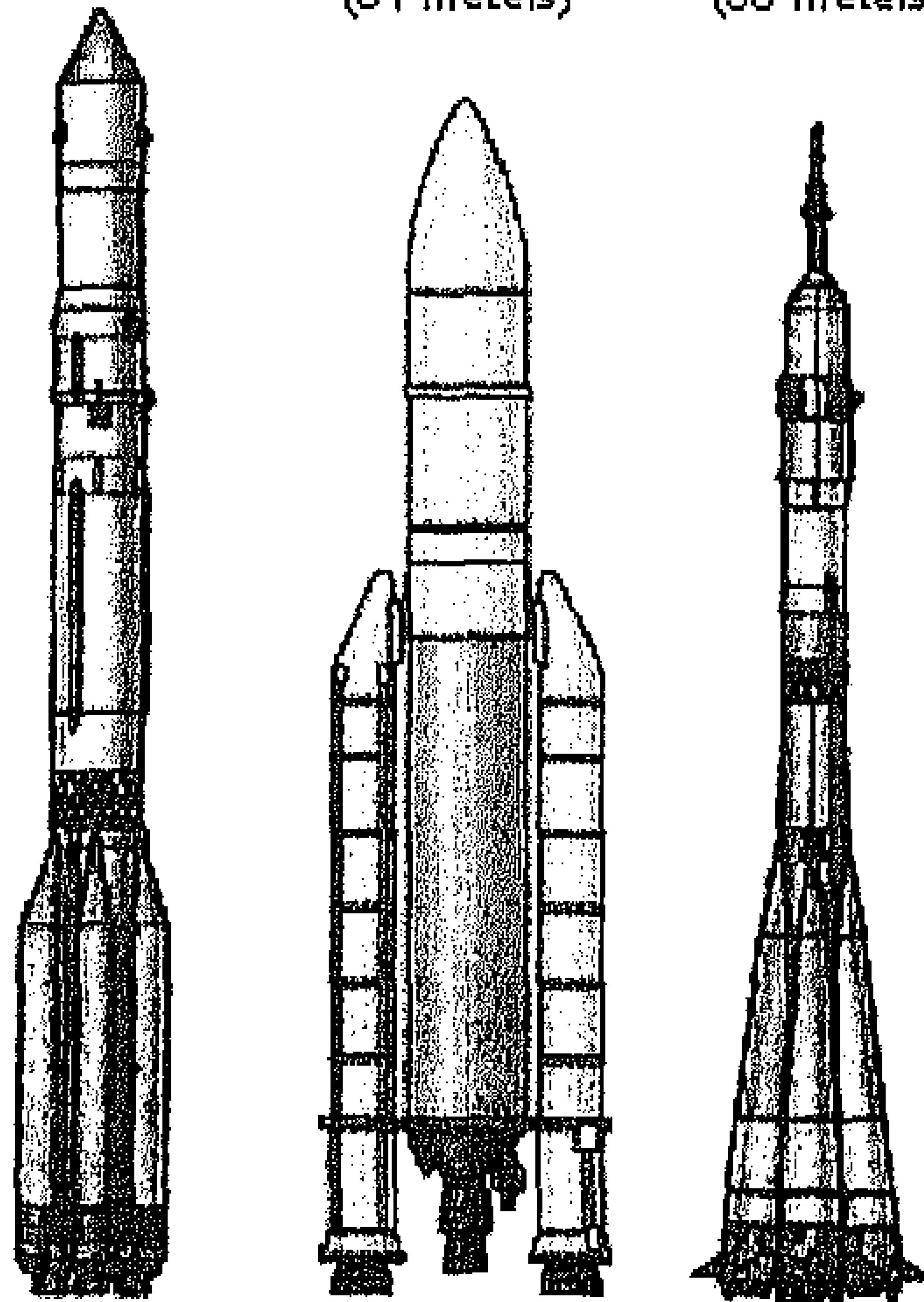
إن أكبر سيئات الأقمار المتزامنة هو بعد المسافة بينها وبين الأرض مما يتطلب زيادة قدرة الإرسال (transmitt power) للمرسلات الموجودة عليها أو زيادة أحجام الهوائيات الصحنية عليها وعلى الأرض. ومن سيئاتها وخاصة في الأقمار الصناعية المستخدمة في الاتصالات الهاتفية هو التأخير الزمني (time delay) في وصول الإشارة بين المحطات الأرضية حيث يبلغ ربع ثانية تقريبا مما يسبب بعض الإرباك عند إجراء المكالمة الهاتفية. أما المدارات غير المتزامنة فهي كل ما عدا المدار المتزامن من مدارات والتي تقع في الغالب تحت المدار المتزامن وتتصف بوجود حركة نسبية بينها وبين الأرض مما يستدعي استخدام هوائيات متحركة للمحطات الأرضية تتبع حركة القمر منذ طلوعه حتى غيابه عن الأفق ويترتب على غياب القمر عن سماء منطقة أرضية محددة انقطاع الاتصالات لحين ظهوره مرة أخرى ولحل هذه المشكلة تستخدم عدة أقمار في نفس المدار بحيث يطلع أحدها عندما يغيب القمر الذي يسبقه ويتحدد عدد الأقمار اللازمة من مواصفات المدار من حيث ارتفاعاته وشكله ومدة طلوعه على المنطقة المراد تغطيتها بنظام الاتصالات. على الرغم من هذه السيئات لأقمار الاتصالات الموضوعة في المدارات غير المتزامنة فإنها تمتاز على الأقمار المتزامنة بقلة استهلاك القدرة اللازمة للبث وكذلك قلة التأخير الزمني في الإشارات المبثوثة وذلك بسبب قربها من الأرض.



3-11 إطلاق الأقمار الصناعية (Sattelite Launching)



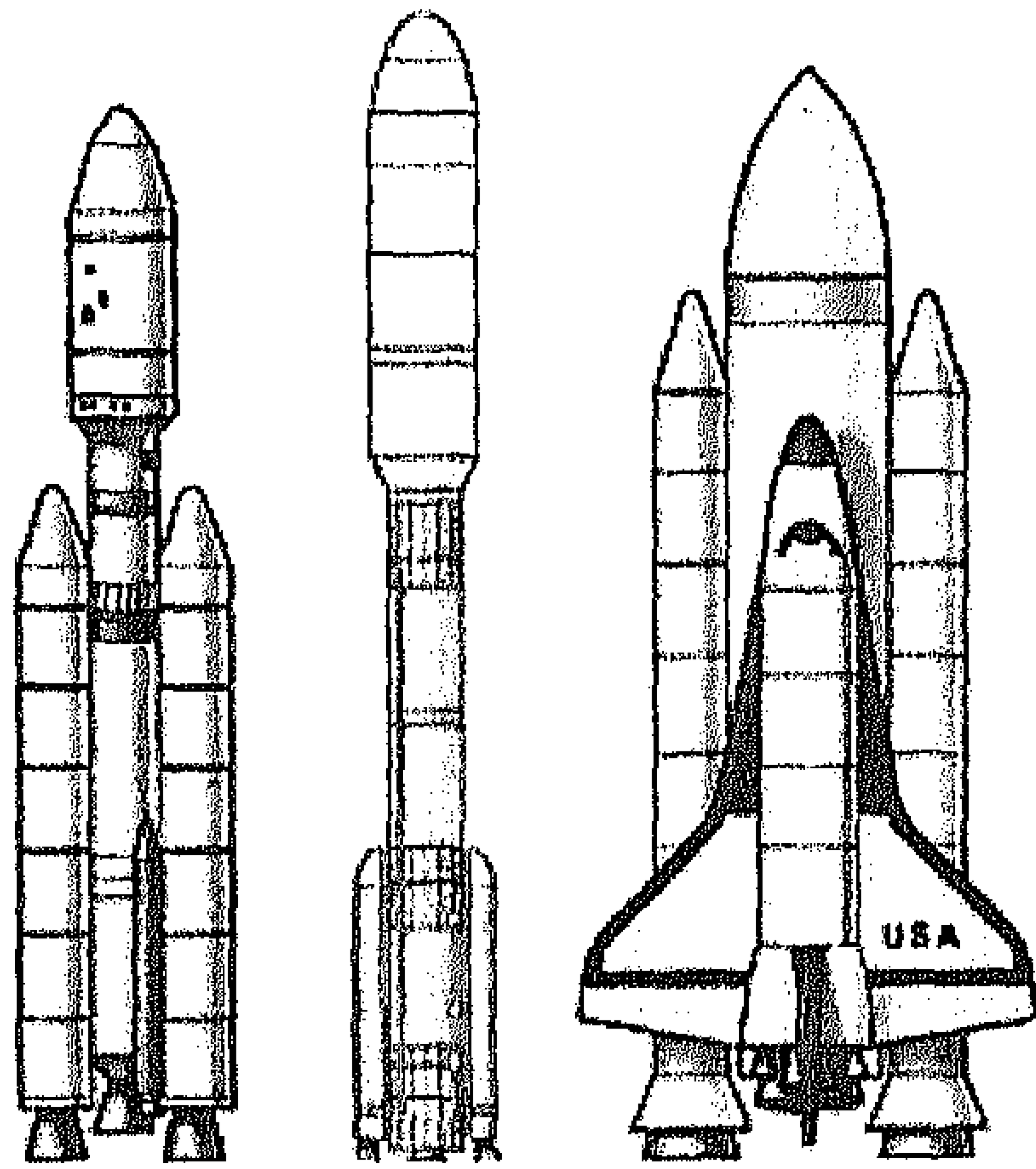
توجد طريقتان لوضـــع الأقمـــار الصناعية في مداراتها أما الطريقة الأولـــى فهي باستخدام الصواريخ غيـــر المســـتردة وأما الطريقة الثانية فهي باستخدام المكوك الفضائي (space shuttle) والذي يحتـــاج أيضا للصواريخ غير المستردة لإخراجـــه من نطاق الجاذبية الأرضية. إن فكرة استخدام الصواريخ في الحروب فكرة قديمة ينســـب اختراعهـــا إلـــى الصينيين في القرن الرابع عشر الميلادي حيث كانت هذه الصواريخ البسيطة تتكون من أنابيب حديدية يـــتم إغلاق أحد فوهتيها بينما تبقى الفوهة الأخرى مفتوحة وعندما يتم ملؤها بالبارود وإشـــعالها فـــإن الغـــازات الناتجة عن الاحتراق تخرج بقوة من الفوهة المفتوحة ويكون رد الفعل أن تنطلق الأنبوبة بقوة فـــي الاتجـــاه المعاكس نحو الهدف المنشود. ولقد بقي تصميم هذه الصواريخ البسيطة على الحال الذي كانت عليه إلـــى أن تم إضافة الزعانف على ذيل الصواريخ وذلك لكي تعمل على تدوير جسم الصاروخ للحفاظ على اتزانه وذلك في منتصف القرن التاسع عشر. لقد كان الدافع الرئيسي وراء تطوير تقنية الصواريخ الحديثة هو حاجة الدول المتحاربة لضرب الأهداف العسكرية والمدنية البعيدة المدى في الدول المعادية والتي لا يمكن لقذائف المدافع الوصول إليها ولا يمكن كذلك المخاطرة بإرسال الطائرات الحربية باهضة الثمن لضربها وذلك تخوفـــا مـــن إسقاطها .



ويعود الفضل الأكبر في وضع الأســـس العلميـــة لتكنولوجيا الصواريخ الحديثة للعـــالم الأمريكـــي "روبـــرت قودارد" حيث قام في عام 1914م بتســـجيل عـــدة بـــراءات اختراع تتعلق بصواريخ تعمل بـــالوقود الســـائل والصـــلب وكذلك تصاميم لصواريخ متعـــددة المراحـــل. وفـــي عـــام 1926م تمكن هذا العالم من إطـــلاق أول صـــاروخ يعمـــل بالوقود السائل ولم يرتفع هذا الصاروخ عن ســـطح الأرض أكثر من عشرة أمتار. وفي بداية الثلاثينيات بـــدأ كـــل مـــن الألمان والروس بالعمل على تطوير تقنية الصواريخ وكـــان على رأس الفريق الألماني العالم الشهير "فون براون" والذي تمكن مع فريقه في عام 1934م من إطلاق صاروخ وصـــل إلى علو ثلاثة كيلومترات. أما الفريق الروسي فقد تمكن من إطلاق صاروخ وصل إلـــى ارتفـــاع 12 كيلـــومتر. وأمـــا الصواريخ الأمريكية التي أطلقها قودارد فلم يتجاوز ارتفاعها عدة كيلومترات إلا أنه ساهم في إضافة عدة تحسينات علـــى

تقنية الصواريخ مثل استخدام الجايرسكوب للحفاظ على اتزان واتجاه الصاروخ أثناء انطلاقه وكذلك استخدام المضخات لضخ الوقود السائل لغرفة الاحتراق. وفي عام 1942م تمكن الألمان من إطلاق صاروخ وصل مداه إلى 200 كيلومتر مما مكنهم في عام 1944م وأثناء الحرب العالمية الثانية من ضرب لندن بأكثر من ألف صاروخ. ومع نهاية الحرب العالمية تمكن الألمان من تطوير أول صاروخ عابر للقارات يمكنه الوصول إلى الولايات المتحدة الأمريكية. ومع هزيمة الألمان في الحرب العالمية الثانية في عام 1945م تمكن الأمريكان من جلب أكثر من خمسين من العلماء والمهندسين الألمان المختصين في تقنية الصواريخ وعلى رأسهم "فون براون" وتمكنوا كذلك من الحصول على أكثر من مائة صاروخ ألماني. وبهذه الإمكانات بدأ الأمريكان العمل على تطوير برامج لإطلاق الصواريخ بعيدة المدى للأغراض الحربية وكذلك لغرض غزو الفضاء. ولا ننسى أن نذكر أن عددا من خبراء تقنية الصواريخ الألمان قد وصلوا أيضا إلى روسيا وانضموا إلى الفريق الروسي وبذلك بدأ التنافس المحموم بين الأمريكان والروس في تطوير تقنية الصواريخ بعيدة المدى.

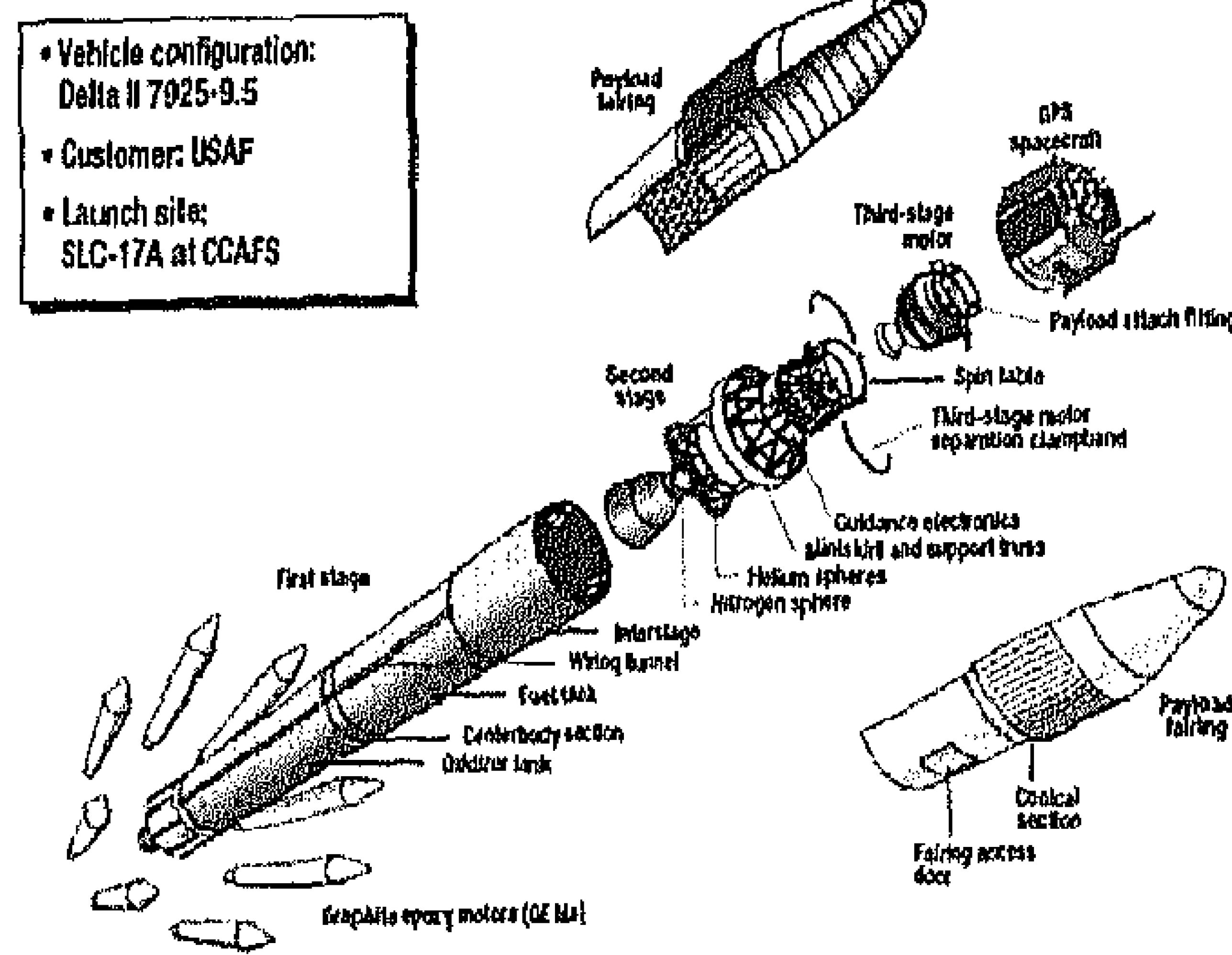
في عام 1950م تمكن الأمريكان من إطلاق صاروخ متعدد المراحل حيث وصل إلى ارتفاع 400 كيلومتر وينطلق بسرعة ثمانية ألاف كيلومتر في الساعة. وفي عام 1957م تمكن الروس من استخدام الصواريخ لوضع أول قمر صناعي في مدار حول الأرض على ارتفاع 600 كيلومتر عن سطح الأرض وتمكنوا في نفس العام من إطلاق قمر صناعي يحمل كائن حي وهو الكلبة "لايكا". وقد صدم الأمريكان من هذه الإنجازات التي أحرزها الروس في مجال غزو الفضاء مما دفعهم لمضاعفة جهودهم في تطوير صواريخهم وقد تمكنوا في عام 1958م من إطلاق أول قمر صناعي. ومرة أخرى تفاجأ الأمريكان في عام 1959م بتمكن الروس من استخدام صواريخ قادرة على الوصول إلى القمر حيث تم تحميلها بأجهزة قياس مختلفة وتم إسقاطها على سطح القمر. أما المفاجئة الأخرى فهو تمكن الروس في عام 1960م من إرسال كلبين في مركبة دارت حول الأرض ثم عادت بسلام إلى الأرض. ولكن سرعان ما تمكن الأمريكان من أخذ زمام الأمور في تقنية إطلاق الصواريخ وذلك بسبب تفوقهم على الروس في مجال التقنيات الأخرى التي تحتاجها الصواريخ كتقنيات الاتصالات والحواسيب والتحكم والإلكترونيات.



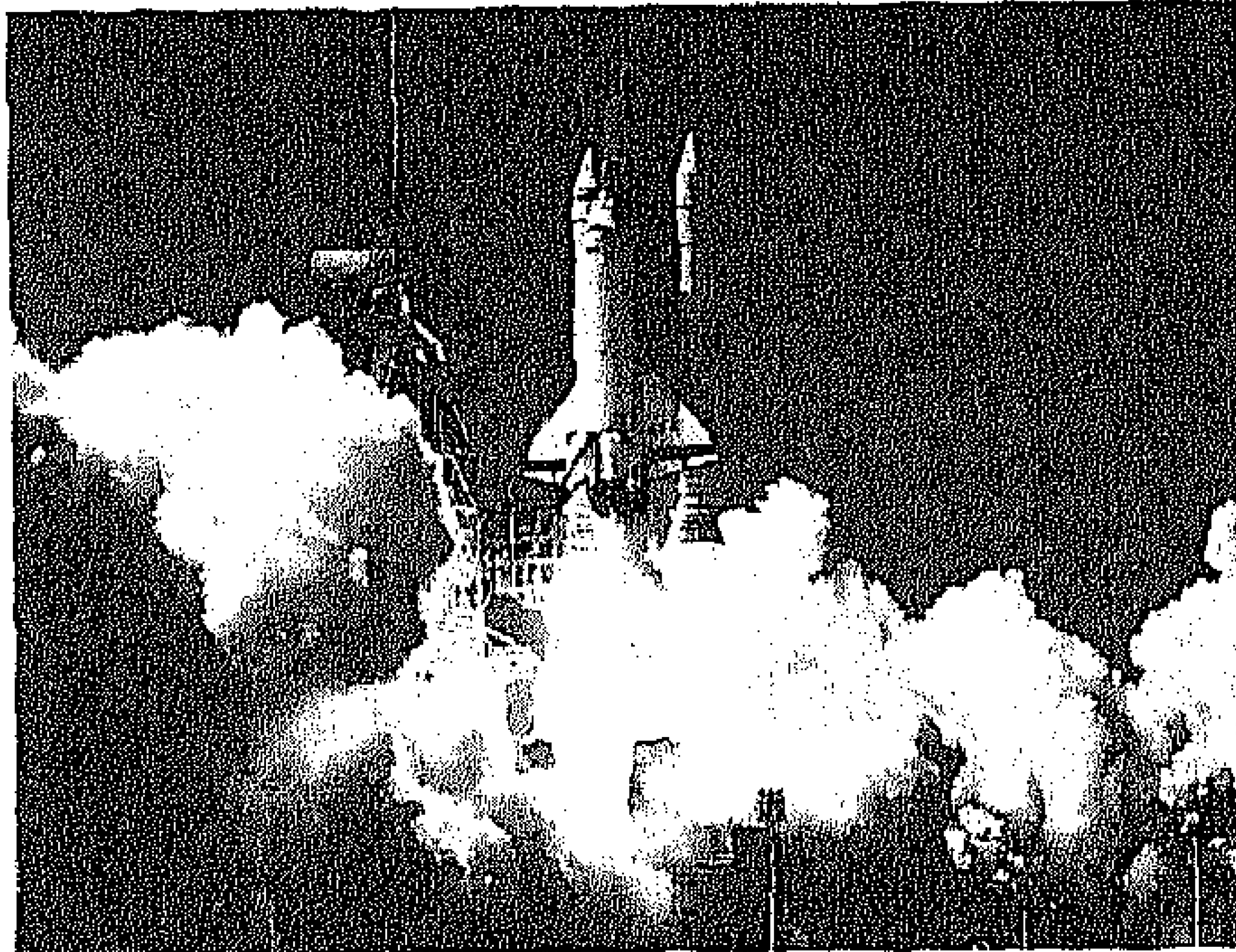
يتحدد نوع الصاروخ من نوع الوقود الذي يستعمله فهناك نوعان من الصواريخ أحدهما يستخدم الوقود الصلب بينما يستخدم النوع الثاني الوقود السائل. ففي الصواريخ التي تعمل بالوقود الصلب يوجد خزان واحد على شكل أسطوانة يتم ملؤه بخليط من أحد أنواع الوقود الصلب مع المادة المؤكسدة وعندما يتم إشعال الفتيل تبدأ عملية احتراق الخليط مخرجة غازات الاحتراق من فوهة غرفة الاحتراق الموجودة في مؤخرة الصاروخ لتدفعه بقوة إلى الأمام. أما صواريخ الوقود السائل فتتكون من خزانين منفصلين يحتوي أحدهما الوقود السائل بينما يحتوي الآخر على المادة المؤكسدة وهي الأوكسجين على شكل سائل ويوجد

كذلك مضخات تقوم بضخ المادتين إلى غرفة الاحتراق. وتتميز صواريخ الوقود الصلب بسهولة تركيبها إلا أن عيبها يكمن في صعوبة التحكم بعملية احتراق الوقود فبمجرد أن يتم إشعال الوقود ولذا فإن عملية الاحتراق لن تتوقف إلا بنفاد الوقود. أما صواريخ الوقود السائل فيمكن التحكم بكمية الاحتراق من خلال التحكم بالكمية التي تضخها مضختي الوقود والمؤكسد ولكن عيبها يكمن في تعقيد تركيبها وزيادة وزنها بسبب وجود المضخات فيها.

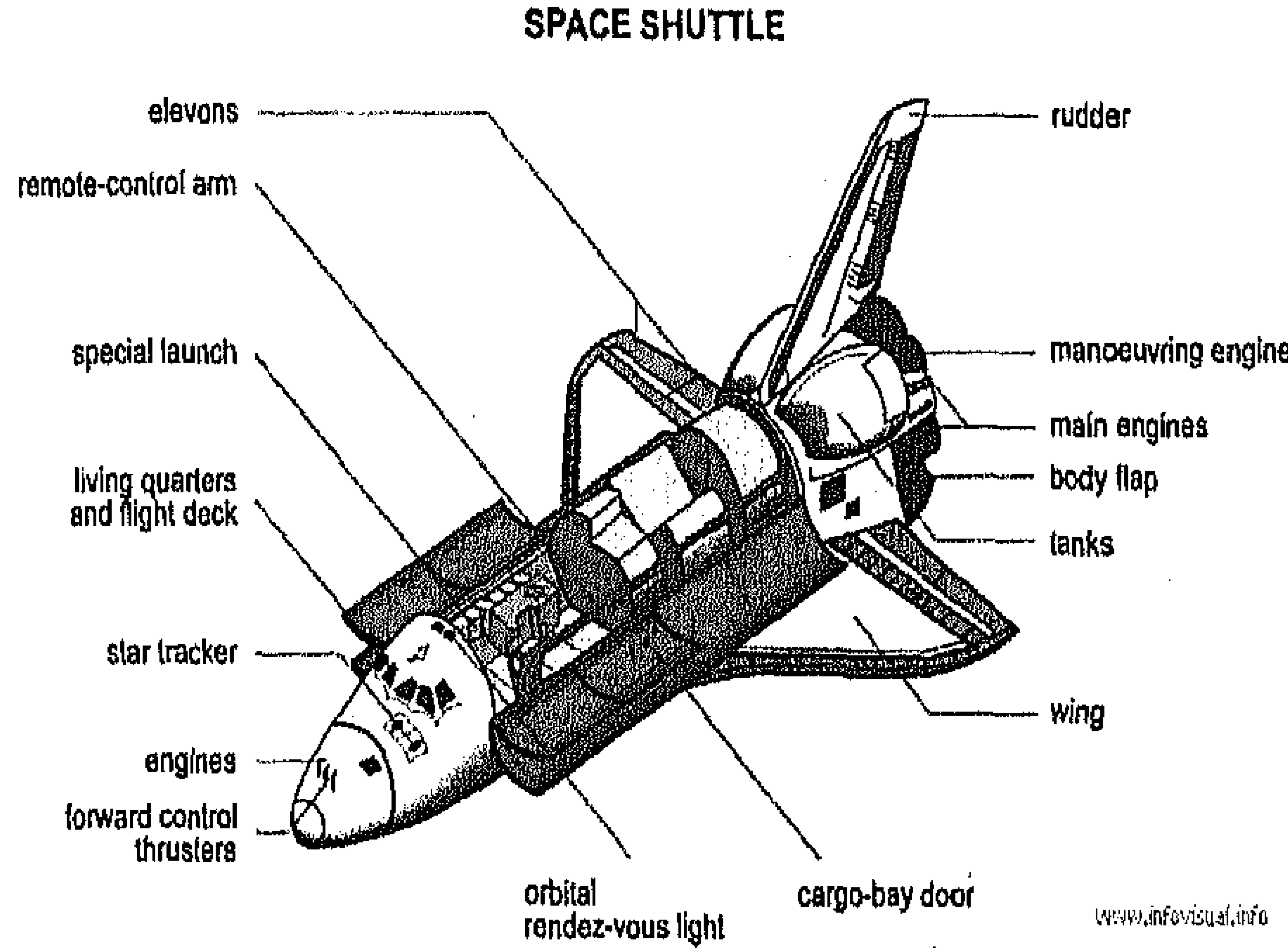
ويتم بناء الصواريخ على شكل جسم أسطواني يزيد طوله كثيرا عن قطره وذلك لتقليل مقاومة الهواء له أثناء انطلاقه في الغلاف الجوي ويتكون هذا الجسم من عدة مراحل فعلى رأس الصاروخ توجد الغرفة التي يوضع فيها الحمل المراد وضعه في المدار كالأقمار الصناعية تليها مرحلتين أو أكثر من المحركات التي يتم تشغيلها على التوالي ابتداءا من المرحلة السفلى والتي يتم فصلها عن جسم الصاروخ بمجرد انتهاء وقودها ليبدأ تشغيل المرحلة التالية. إن استخدام المراحل في تصميم الصواريخ ضروري لكي يتم تخفيف وزن الصاروخ شيئا فشيئا أثناء انطلاقه وبذلك نمكنه من الوصول إلى سرعات أعلى وبالتالي ارتفاعات أعلى. ويلزم على الأقل مرحلتين من المحركات في الصاروخ فالمرحلة الأولى تضع الصاروخ في مدار تقريبي حول الأرض ويمكن استخدام الوقود الصلب أو السائل في هذه المرحلة بينما تقوم المرحلة الثانية بوضع القمر الصناعي في المدار الصحيح المخصص له ولذا يجب أن تستخدم محركات الوقود السائل لكي يتم التحكم بتشغيلها أو إيقافها أثناء مناورة وضع القمر في مداره. ويلزم في كثير من الأحيان وضع صواريخ مساعدة يتم تثبيتها على جسم الصاروخ الرئيسي يتم تشغيلها مع المرحلة السفلى من الصاروخ لتعطيه مزيدا من قوة الدفع. وتتراوح أطوال الصواريخ الحديثة المستخدمة لنقل الأقمار الصناعية بين 50 و 60 مترا وقطرها بين 4 و 6 أمتار بينما يتراوح وزنها بين 500 و 1000 طن أما حملها فيتراوح بين 10 و 20 طن. فعلى سبيل المثال فإن الجيل الخامس من صاروخ إيريان الأوروبي والذي ظهر في عام 1997م يبلغ وزنه 777 طن وارتفاعه 51 مترا وقطره 5.4 مترا وحمله 16 طن للمدارات المنخفضة و 7 طن للمدارات المتزامنه ويبلغ وزن الوقود في المرحلة الرئيسية 155 طن من الأوكسجين والهيدروجين أما دفعها فيبلغ مليون نيوتن تقريبا.



أما الطريقة الثانية المستخدمة في نقل الأقمار الصناعية وغيرها من الأحمال إلى مداراتها فهي باستخدام ما يسمى بالمكوك الفضائي (Space Shuttle) والذي لا ينحصر استخدامه في الولايات المتحدة الأمريكية فقط. وعلى عكس من الصواريخ التي لا يعود منها إلى الأرض شيئا فإن المكوك الفضائي يعود بكامله إلى الأرض ليعاد استخدامه من جديد. والمكوك الفضائي له شكل طائرة بجناحين وذيل وعجلات ويمكنه الهبوط على مدارج الطائرات العادية ويمكن إعادة

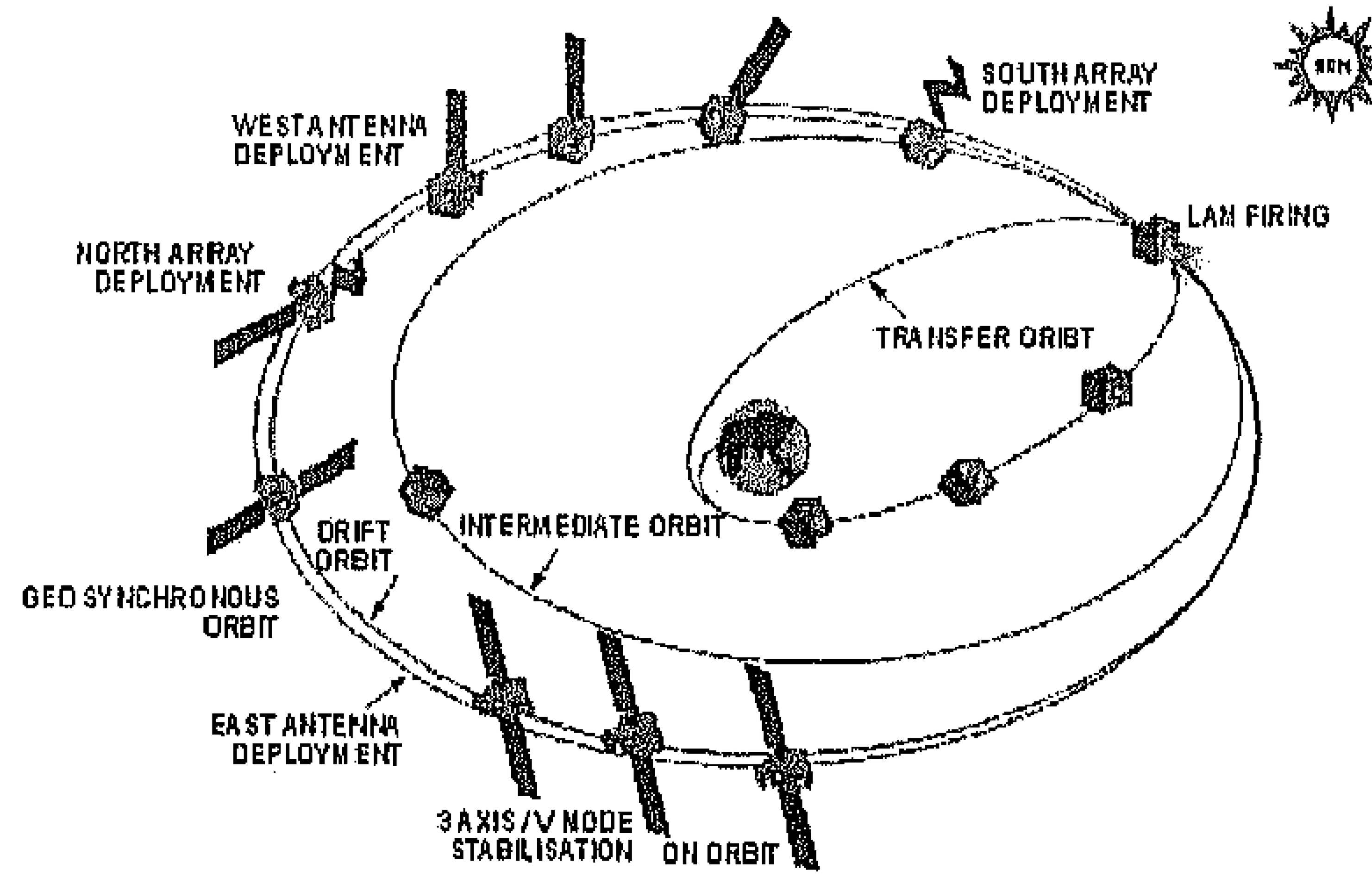


استخدامه لما يقرب من مائة مرة وبفاصل زمني لا يتجاوز اسبوعين بين عمليات الإطلاق. وقد صمم المكوك بحيث يمكنه المكوث في الفضاء لمدة ثلاثين يوما وقد تم ضبط الضغط في داخل قمرة القيادة ليماثل الضغط الجوي الأرضي بحيث يمكن للرواد البقاء في داخله بملابسهم العادية. وإلى جانب قمرة القيادة التي تقع في مقدمة المكوك يوجد صندوق يبلغ طوله 18 متر وعرضه خمسة أمتار يستخدم لحمل مختلف أنواع الحمولات التي قد يصل وزنها إلى 29 طنا كالأقمار الصناعية وقطع المختبرات الفضائية. وفي عام 1982م تم إطلاق مكوك الفضاء الأمريكي "كولومبيا" لأول مرة وكان يحمل قمرين صناعيين تمكن الرواد الذين على ظهره من وضعهما في مداريهما. وفي عام 1983م تم إطلاق مكوك الفضاء الأمريكي "تشالينجر" لأول مرة والذي تم استخدامه لوضع مختلف أنواع الأقمار الصناعية في مداراتها وتم إطلاق مكوك الفضاء الأمريكي "ديسكفري" في عام 1984م والمكوك "أتلانتس" في عام 1985م وفي عام 1986م تعرض مكوك الفضاء "تشالينجر" لحادث مؤسف حيث قتل سبعة من الرواد وهم على متنه. وفي عام 1992م تم إطلاق مكوك الفضاء الأمريكي "إنديفور" وقد تمكن الرواد الذين على ظهره من الإمساك بأحد الأقمار الصناعية وإصلاحه.



وفي عام 1995م تمكن المكوك الفضائي الأمريكي "أتلانتس" من الالتحام بسفينة الفضاء الروسية "مير". وفي عام 1998م تم استخدام المكوك لإرسال رواد فضاء للعيش على متن محطة الفضاء الدولية التي بوشر في بناءها في الفضاء في عام 1998م بجهود مشتركة من الأمريكان والروس والتي لا زالت تعمل إلى الآن. ويحتاج المكوك إلى صواريخ مساعدة لوضعه في مداره حول الأرض ولكن يمكنه الرجوع إلى الأرض باستخدام محركاته الخاصة وبمساعدة الجاذبية الأرضية. ويبلغ طول المكوك إنديفور على سبيل المثال 37 مترا وعرضه عند أجنحته 24 مترا وارتفاعه 18 مترا أما وزنه فارغا فيبلغ 78 طن ووزن حمولته 25 طن. ويتم حمل المكوك إلى الفضاء باستخدام محرك المكوك بعد تزويده بالوقود من خزان ضخم مثبت على بطن المكوك يبلغ طوله 47 متر وقطره 8.4 متر وسعته 730 طن من الوقود وباستخدام صاروخين مساعدين يبلغ طول الواحد منهما 47 مترا وقطره 3.7 متر ووزنه عند الاقلاع 590 طن وبهذا يكون مجموع وزن المكوك مع تنك الوقود والصاروخان المساعدان ألفي طن وتبلغ قوة الدفع الكلية عند الاقلاع 30 مليون نيوتن.

إن عملية وضع الأقمار الصناعية في مداراتها باستخدام الصواريخ أو المكوك الفضائي عملية بالغة التعقيد وباهضة التكاليف ولا تتم إلا تحت سيطرة حواسيب عملاقة حيث أن الإشارات التي تبعث بها أجهزة القياس الموجودة على الصاروخ والإشارات التي تبعث بها أجهزة التحكم الموجودة في المحطات الأرضية من الكثرة ومن سرعة الحدوث بحيث لا يمكن للمهندسين معالجتها يدويا. وإلى جانب المحطة الأرضية الموجودة في موقع الإطلاق يوجد عدة محطات للمراقبة والتحكم موزعة في مناطق مختلفة من الكرة الأرضية لكي تتمكن من استلام الإشارات التي تبعث بها أجهزة القياس والتحكم الموجودة على ظهر الصاروخ عند غياب الصاروخ عن مدى رؤية المحطة الرئيسية. إن القوة لوحدها لا تكفي لوضع الأقمار الصناعية في مدارات حول الأرض فالصاروخ الذي تصل سرعته إلى سرعة الإفلات وهي 11.2 كيلومتر في الثانية (40320 كيلومتر في الساعة) يمكنه الخروج من جاذبية الأرض بشكل نهائي ولا يمكنه العودة إليها. ولذلك فإن وضع القمر الصناعي في مدار أرضي يتطلب التحكم بسرعة وكذلك اتجاه الصاروخ في كل لحظة زمنية لكي نضمن عدم افلاته من الجاذبية الأرضية والضياع في الفضاء الخارجي. ولذلك فإن الصاروخ وكذلك القمر الذي يحمله تحتوي على معدات معقدة تقوم بقياس سرعة واتجاه الصاروخ يتم إرسالها إلى المحطات الأرضية لكي تقوم بإرسال إشارات التحكم المناسبة التي تعمل على تصحيح مسار إنطلاق الصاروخ. وفي العادة يتم إطلاق الصاروخ بشكل عامودي ليقطع أقصر مسافة ممكنة في الغلاف الجوي وذلك لتقليل الاحتكاك بالهواء إلى أقل قدر ممكن وعندما يصل الصاروخ إلى ارتفاع 200 كيلومتر حيث تخف عندها كثافة الهواء يبدأ الصاروخ بالإنحراف باتجاه المدار المنوي وضع القمر فيه. وعادة ما يتم بشكل ابتدائي وضع جميع أنواع الأقمار الصناعية في مدارات منخفضة تبدأ ارتفاعاتها من 300 كيلومتر عن سطح الأرض ومن ثم يتم نقل هذه الأقمار إلى مداراتها النهائية باستخدام محركات المرحلة الأخيرة من الصاروخ. ولكي يتم وضع قمر في مدار دائري على ارتفاع 300 كيلومتر عن سطح الأرض فإن يلزم أن تصل سرعة الصاروخ إلى 27878 كيلومتر في الساعة.

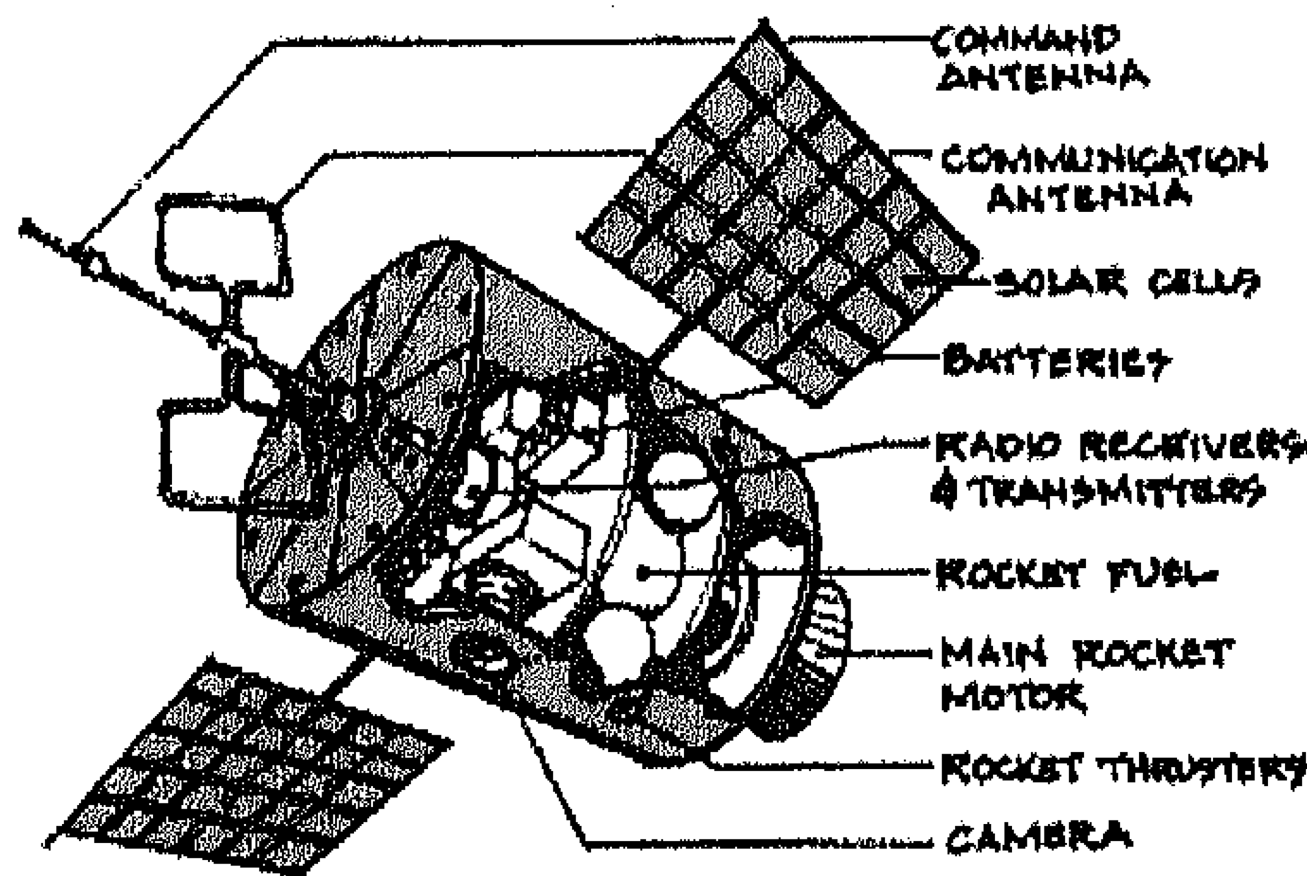


وتتم عملية وضع القمر في مثل هذه المدارات في عدة دقائق ويستهلك الصاروخ في هذه المرحلة معظم الوقود الذي يحمله ولكن يبقى في المحرك الأخير من الصاروخ ما يكفي من الوقود لوضع القمر في مداره النهائي ولكنها كمية قليلة حيث أن الصاروخ قد تخلص من معظم وزنه إلى جانب انخفاض احتكاك الهواء بشكل كبير عند هذه الارتفاعات. وتعتبر عملية نقل الأقمار الصناعية من المدارات المنخفضة إلى المدارات المتزامنة من أصعب عمليات الإطلاق حيث تحتاج إلى مناورات دقيقة لكي يتم وضع القمر المتزامن في مكانه الصحيح خاصة مع وجود مئات الأقمار الصناعية في هذا المدار. وتتم هذه العملية من خلال نقل القمر من المدار المنخفض إلى مدار وسيط يسمى مدار الانتقال (transfer orbit) وهو مدار بيضاوي الشكل يلامس حضيضه المدار المنخفض بينما يلامس أوجه المدار المتزامن. ولكي يتم نقل القمر من المدار المنخفض إلى المدار الانتقالي فإنه يلزم رفع سرعته من 28000 كيلومتر في الساعة على افتراض أن ارتفاعه 300 كيلومتر إلى 36540 كيلومتر في الساعة ويتم ذلك من خلال تشغيل محركات الدفع

المرتبطة بالقمر لفترة زمنية محسوبة بدقة عند نقطة الحضيض. أما الخطوة التالية فهي نقل القمر من المدار الانتقالي إلى المدار المتزامن ويتم ذلك من خلال تشغيل المحركات عندما يكون القمر في نقطة الأوج على ارتفاع 36000 كيلومتر وهو ارتفاع المدار المتزامن. وبما أن سرعة القمر عند نقطة الأوج وهو في المدار الانتقالي تبلغ 5796 كيلومتر في الساعة فإنه يلزم رفع هذه السرعة إلى 11050 كيلومتر في الساعة لكي يبدأ بالدوران في المدار المتزامن. ويتحدد وزن وحجم القمر الصناعي المراد إطلاقه من إمكانات صواريخ الإطلاق التي تقوم بنقلها من الأرض إلى مداراتها ففي الستينات لم تتجاوز حمولة صاروخ الإطلاق إلى المدار المتزامن عدة مئات من الكيلوجرامات ثم ارتفع هذا الرقم إلى ألف كيلوجرام في السبعينات ثم إلى ألفي كيلوجرام في الثمانينات وإلى ثلاثة آلاف كيلوجرام في بداية التسعينات وخمسة آلاف كيلوجرام في نهايتها وتصل الحمولة الآن إلى ما يزيد من 20 آلف كيلوجرام. ويمكن رفع الحمولة إلى الضعف في حالة إرسال الأقمار إلى المدارات المنخفضة غير المتزامنة. ويعتبر صاروخ دلتا التابع لشركة بوينغ الأمريكية من أكثر الصواريخ المستخدمة في إطلاق الأقمار الصناعية حيث أطلق ما يزيد عن ثلاثمائة قمر منذ عام 1960م ويليه صاروخ أطلس التابع لشركة لوكهيد الأمريكية الذي أطلق عددا مماثل من الأقمار الصناعية ثم صاروخ بروتون الروسي الذي أطلق ما يزيد عن مائتي قمر منذ عام 1960م وصاروخ إيريان الأوروبي الذي أطلق ما يزيد عن مائتي قمر منذ عام 1981م. بدأ البرنامج الأوروبي لإطلاق الأقمار الصناعية في عام 1979م باستخدام صاروخ إيريان وقد بلغ وزن الجيل الأول من صاروخ إيريان 210 أطنان عند الإطلاق وقادر على حمل ما يقرب من ألفي كيلوغرام.

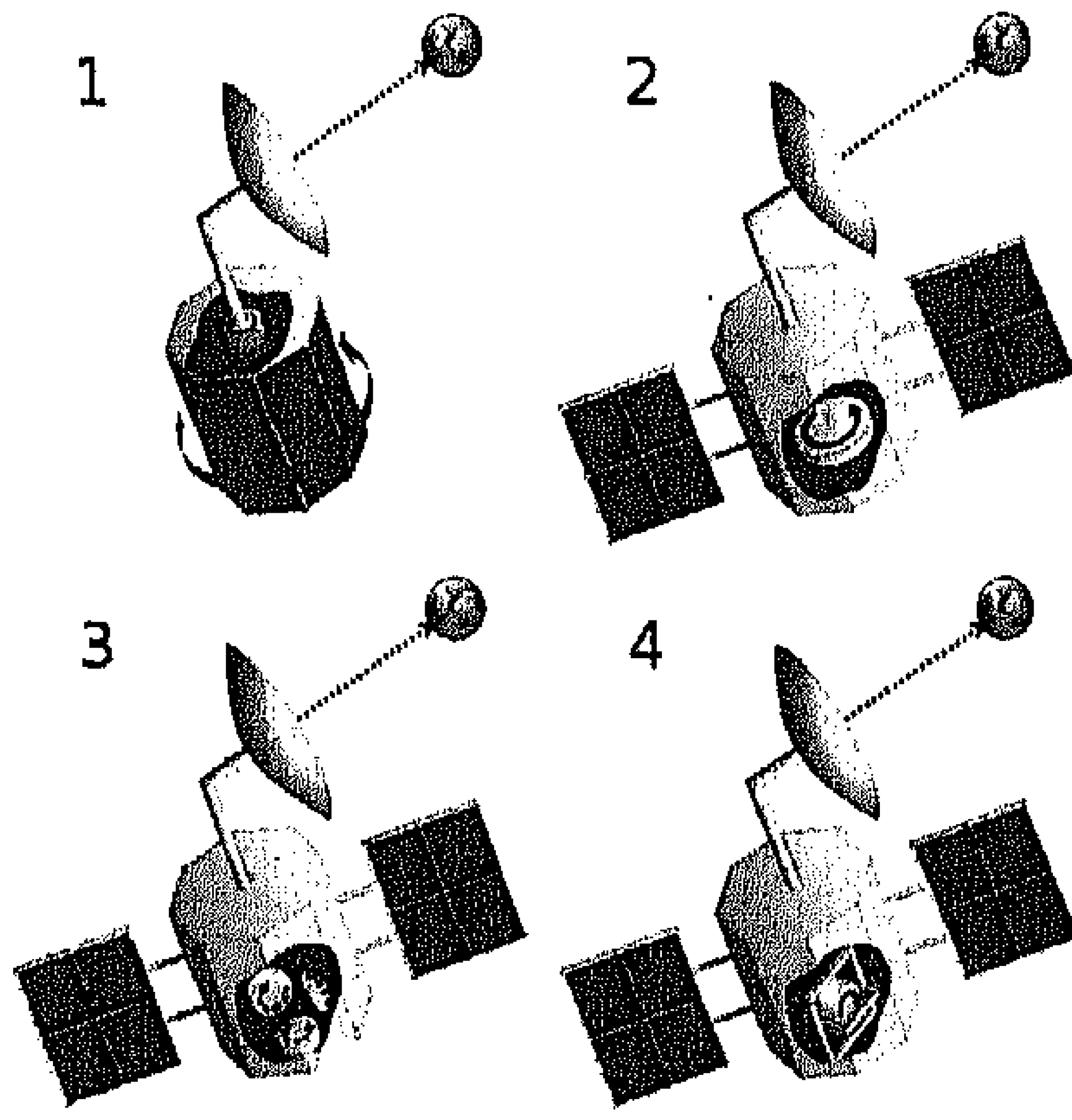
4-11 مكونات القمر الصناعي

يحمل القمر الصناعي نوعين من الأجهزة فالنوع الأول هي أجهزة أساسية موجودة في جميع أنواع الأقمار الصناعية أما النوع الثاني فهي أجهزة خاصة بالمهمة التي يقوم بها القمر. فمن أهم المكونات الأساسية الأجهزة التي تؤمن الطاقة الكهربائية اللازمة لتشغيل مختلف الأجهزة الموجودة على القمر. ويتكون نظام الطاقة من عدد كبير من الخلايا الشمسية (solar cell array) التي يتم ترصيعها على جسم القمر أو على أجنحة ممتدة منه تقوم بتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية تخزن في بطاريات (battery) لتشغيل أجهزته المختلفة. وتعتمد مساحة الخلايا الشمسية على كمية الطاقة الكهربائية التي تلزم لتشغيل أجهزة القمر وهي أكبر ما تكون في أقمار الاتصالات حيث تصل القدرة في بعض الأنواع إلى عشرة آلاف واط. وإذا ما علمنا أن المتر المربع الواحد من الخلايا الشمسية الحديثة ينتج ما يقرب من مائتين وخمسين واط فإن قمرا صناعيا يستهلك عشرة آلاف واط يلزمه 40 متر مربع من الخلايا الشمسية. أما المكون الثاني فهي أنظمة الاتصالات والتي تقوم بمهام متعددة أهمها تأمين الاتصال بين المحطات الأرضية



مع القمر حيث يلزم التحكم بالقمر بشكل مستمر من بداية إطلاقه إلى نهاية عمره لضمان وضعه في المدار المخصص له. أما المهمة الثانية فهي نقل إشارات القياس التي تلتقطها الحساسات عن حالة الأجهزة المختلفة التي يحملها القمر إلى المحطات الأرضية لاتخاذ الإجراءات المناسبة عند حدوث أي خلل فيها. وأما المهمة الثالثة فهي بالطبع نقل المعلومات المتعلقة بالوظيفة التي يقوم بها القمر كإرسال الصور التي تلتقطها أقمار المناخ والتجسس والفلك وغيرها.

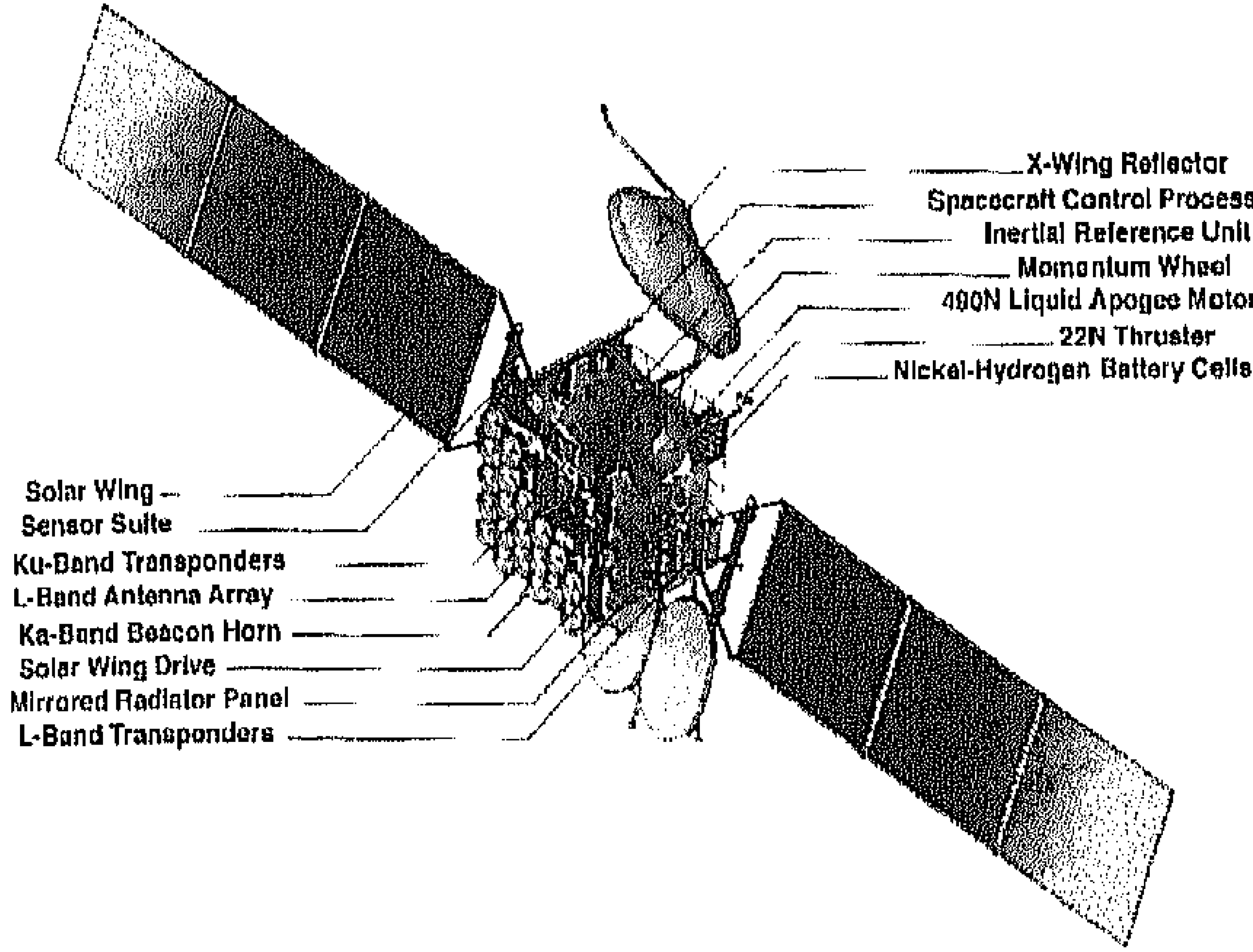
ويحمل القمر أجهزة تعمل على حفظ اتزان القمر الذي قد يتذبذب لأدنى قوة تؤثر عليه بسبب انعدام الجاذبية وذلك لكي تبقى الهوائيات موجهة بشكل بالغ الدقة إلى الأرض. ويتم ذلك من خلال طريقتين القديمة منهما وهي ما تسمى الاستقرار بالتدوير (spin stabilized) ويتم فيها تدوير جسم القمر الخارجي حول محور معين بسرعة عالية فيبقى القمر موجها نحو الأرض بسبب ما يسمى التأثير الجايروسكوبي (gyroscopic effect). أما جسم القمر الداخلي والذي يتم تثبيت الهوائيات عليه فيتم تدويره بعكس اتجاه تدوير الجسم الخارجي ولكن بسرعة بطيئة جدا بمعدل دورة في اليوم بحيث تبقى الهوائيات موجهة نحو الأرض. وفي هذا النوع يلزم وضع الخلايا الشمسية على سطح جسم القمر ذي الشكل الاسطواني. أما الطريقة الحديثة فهي ما يسمى الاستقرار ثلاثي المحاور (3-axis stabilization) حيث يتم استخدام أقراص ثقيلة تدور حول ثلاث محاور متعامدة بسرعات عالية وبسبب التأثير الجايروسكوبي تعمل هذه الأقراص على استقرار جسم القمر بالاتجاه المطلوب. ويتم توجيه هوائيات القمر نحو الأرض باستخدام مجموعة من الحساسات (sensors) التي تعمل تحت تأثير الأجرام السماوية فحساس الشمس (sun sensor) يتجه نحو ضوء الشمس وحساس الأرض (earth sensor) يتجه نحو الأرض بفعل جاذبيتها أو حرارتها أو مجالها المغناطيسي. وبسبب غياب الهواء في الفضاء الخارجي حيث توجد الأقمار فإنه يلزم طرق معقدة للتخلص من الحرارة التي تولدها الأجهزة الإلكترونية بالإشعاع حيث أن الحرارة الزائدة تعمل على تقليل كفاءة عمل هذه الأجهزة بل قد يعرضها للتلف.



وقد يلزم في بعض الأحيان تسخين الجو المحيط ببعض أجهزة القمر الصناعي كالبطاريات مثلا حيث أن درجات الحرارة قد تنخفض مئات الدرجات تحت الصفر المئوي مما يؤدي إلى فشل الأجهزة للقيام بوظائفها. ويحمل القمر كذلك مجموعة أنابيب مملوءة بالغاز تستخدم كوسيلة دفع عند نفث الغاز منها للحفاظ على القمر في مداره المحدد والذي قد ينحرف تدريجيا عن مساره نتيجة للقوى المؤثرة عليه من الجسيمات القادمة من الشمس والفضاء الخارجي وغالبا ما يتحدد عمر القمر الافتراضي من كمية الغاز الموجودة على ظهره حيث يصل عمر الأقمار الحديثة ما يقرب من خمس عشرة عاما. ويتم تغليف الأجهزة الإلكترونية بدروع معدنية (metallic shield) لضمان عدم تعرضها للإشعاعات الضارة القادمة من الشمس والفضاء الخارجي. ويخصص لكل قمر محطة أرضية تعمل على مراقبة وضعه في مداره وحالة أنظمته المختلفة من خلال أجهزة قياس ومجسات مختلفة تقوم بإرسال قياساتها إلى المحطة الأرضية التي ترسل الأوامر لتصحيح

وضع القمر وإصلاح الأعطال التي قد تصيب أجهزته وكذلك توجيه الهوائيات إلى مناطق التغطيـة المختلفـة على سطح الأرض.

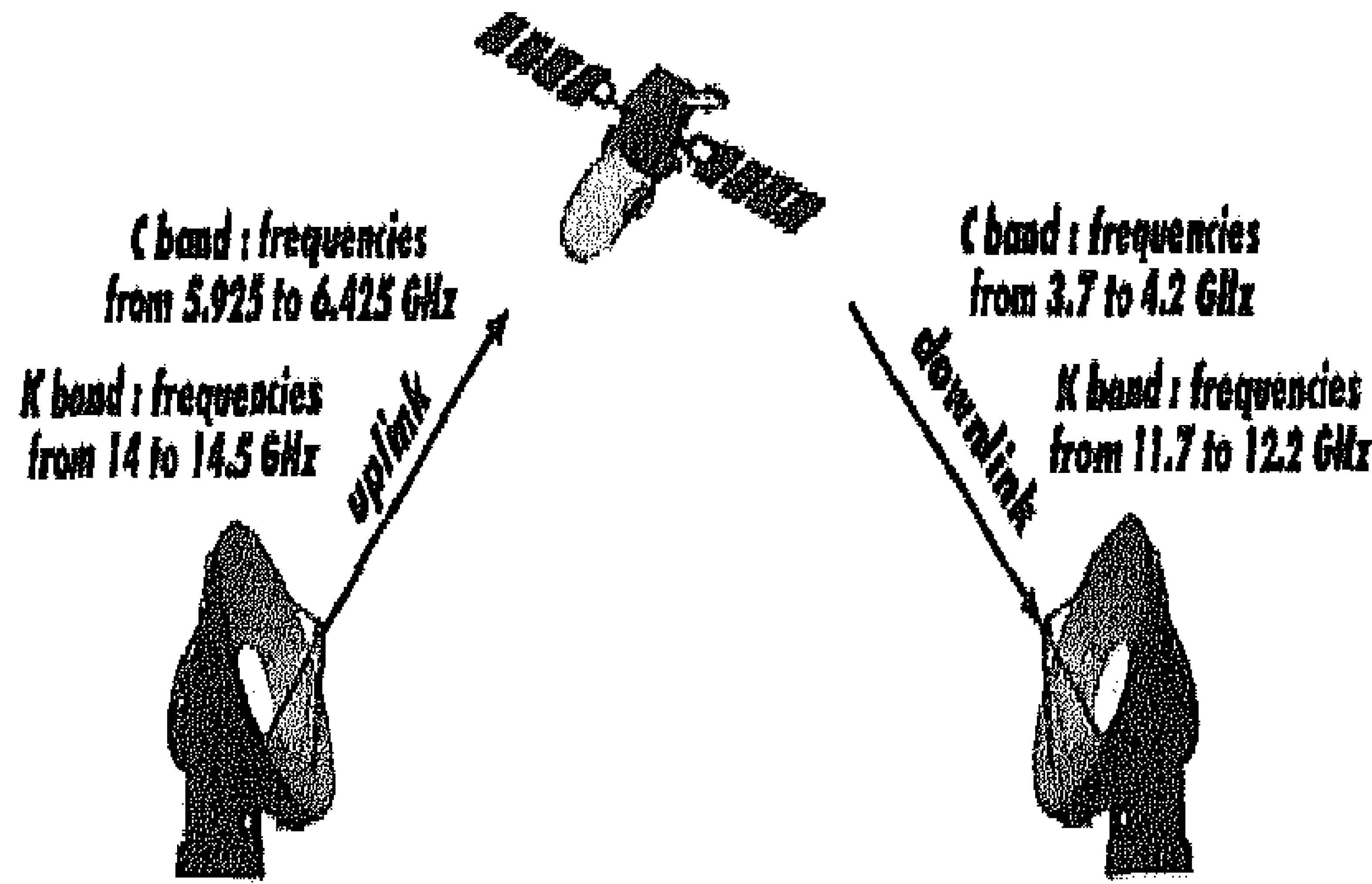
5-11 الأقمار الصناعية للاتصالات (Telecommunication Satellites)



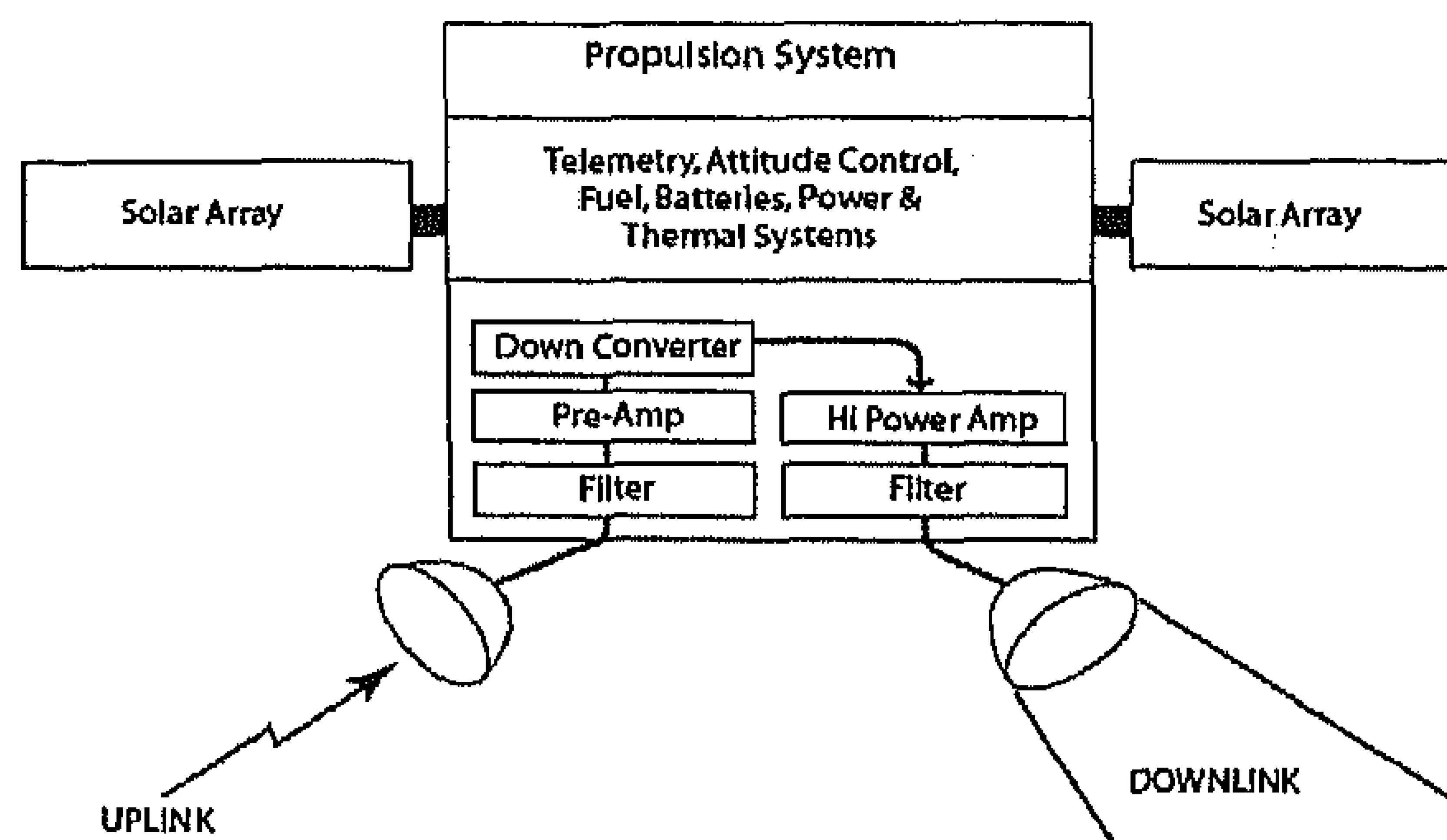
لقد وصل مهندسو الاتصـالات في منتصف القرن العشرين إلى طريـق مسدود وهـم يحـاولون بنـاء أنظمـة اتصالات تقوم بنقل المكالمات الهاتفيـة الدولية وخاصة فيما بين دول القـارات المختلفة والـدول التـي تفصـل بينهـا عوائق طبيعية كالبحار وسلاسل الجبـال الشاهقة والصحارى الشاسعة. فأنظمـة الأمـواج الدقيقـة (microwave systems) التي ظهرت فـي منتصـف الأربعينات من القرن العشرين لا يمكـن استخدامها فيما بين القارات وهي صعبة الإنشاء وباهضة التكاليف فيما بين الدول التي يفصل بينهـا عوائـق طبيعية حيث يتطلب وضع معيد كل مائة كيلومتر على أقصى تقدير ويتطلب تزويـدها بالطاقـة الكهربائيـة لتشغيل أجهزتها الإلكترونية. أما أنظمة الكوابل المحورية فإن مدها في المحيطات وعبـر سلاسـل الجبـال الشاهقة والصحارى الشاسعة يتطلب وقتا وجهدا كبيرا وكلفة عالية إذا ما علمنا أن عـدد المكالمـات التـي يحملها الكيبل المحوري لا يتجاوز عدة مئات. فأول كيبل محوري تم مده بين أمريكا الشمالية وأوروبا لتـوفير خدمة الخدمة الهاتفية وذلك في عام 1956م لم تتجاوز سعته خمسين مكالمة هاتفيـة رغـم كلفتـه العاليـة. ولهذه الأسباب اقترح كاتب الخيال العلمي الإنكليزي أرثر كلارك (Arthur Clarke) في عام 1945م فكرة لحل مشكلة الاتصالات فيما بين القارات وبين الدول التي تفصل بينها عوائق طبيعية وذلـك بوضـع أقمـار صناعية في مدارات حول الأرض. وتعمـل هـذه الأقمـار كمعيـدات للأمـواج الدقيقـة (microwave repeaters) تقوم باستقبال الإشارات من محطات أرضية ثم تعيد بثها ثانية إلى الأرض لتسـتلمها محطـات أرضية أخرى على بعد آلاف الكيلومترات. فكرة ذكية ولكن يحول دون تحقيقها عشرات المشاكل والتي من أهمها أن وضع أقمار صناعية في مدارات حول الأرض يتطلب وجود صواريخ دفع جبارة لإخراجـه مـن نطاق الجاذبية الأرضية. وكذلك مشكلة توفير الطاقة اللازمة لتشغيل أجهزة الاتصـالات الموجـودة عليهـا ومشكلة الحفاظ على هوائيات الإرسال والاستقبال موجهة نحو الأرض باستمرار ومشكلة انقطاع الاتصالات أثناء فترة غياب الأقمار غير المتزامنة عن سماء منطقة معينة على الأرض وغيرها من المشاكل.

ويحمل القمر الصناعي المستخدم لأغراض الاتصالات إلى جانب المعدات الأساسية عدد من أجهزة الاستقبال والإرسال تسمى المستجيبات (transponders). ويتكون المستجيب من مستقبل منخفض الضـجيج (low noise amplifier) ومرسل عالي القدرة (high power amplifier) ومحول تـردد (frequency downconverter) ومرشحات نطاقية التمرير (bandpass filters) وهوائي (antenna) يعمل كهـوائي

إرسال وهوائي استقبال في نفس الوقت باستخدام ما يسمى بالمبدل (duplexer) ويمكن لهذا الهوائي أن يخدم واحد أو أكثر من هذه المستجيبات. ويلزم لاستخدام هوائي واحد للإرسال والاستقبال سواء في القمر الصناعي أو المحطات الأرضية استخدام ترددين مختلفين لحمل إشارة المعلومات من محطة أرضية إلى محطة أرضية أخرى عبر القمر الصناعي. فالتردد الأول يستخدم لنقل الإشارة من المحطة الأرضية المرسلة إلى القمر وتسمى الوصلة الصاعدة (uplink) وأما التردد الثاني فيستخدم لنقل نفس الإشارة من القمر إلى المحطة الأرضية المستقبلة وتسمى الوصلة النازلة (downlink) وغالبا ما يكون الفرق بين الترددين 2 جيقا هيرتز. وتتم عملية تحويل التردد بين الوصلتين في المستجيب في جهاز يسمى المحول الدوني للتردد (frequency downconverter). وفي نطاق السي (C-band) تم تخصيص الترددات من 5.925 إلى 6.425 جيقاهيرتز للوصلة الصاعدة والترددات من 3.7 إلى 4.2 جيقاهيرتز للوصلة النازلة. وفي نطاق الكي-يو (Ku-band) تم تخصيص الترددات من 14 إلى 14.5 جيقاهيرتز للوصلة الصاعدة والترددات من 11.7 إلى 12.2 جيقاهيرتز للوصلة النازلة.



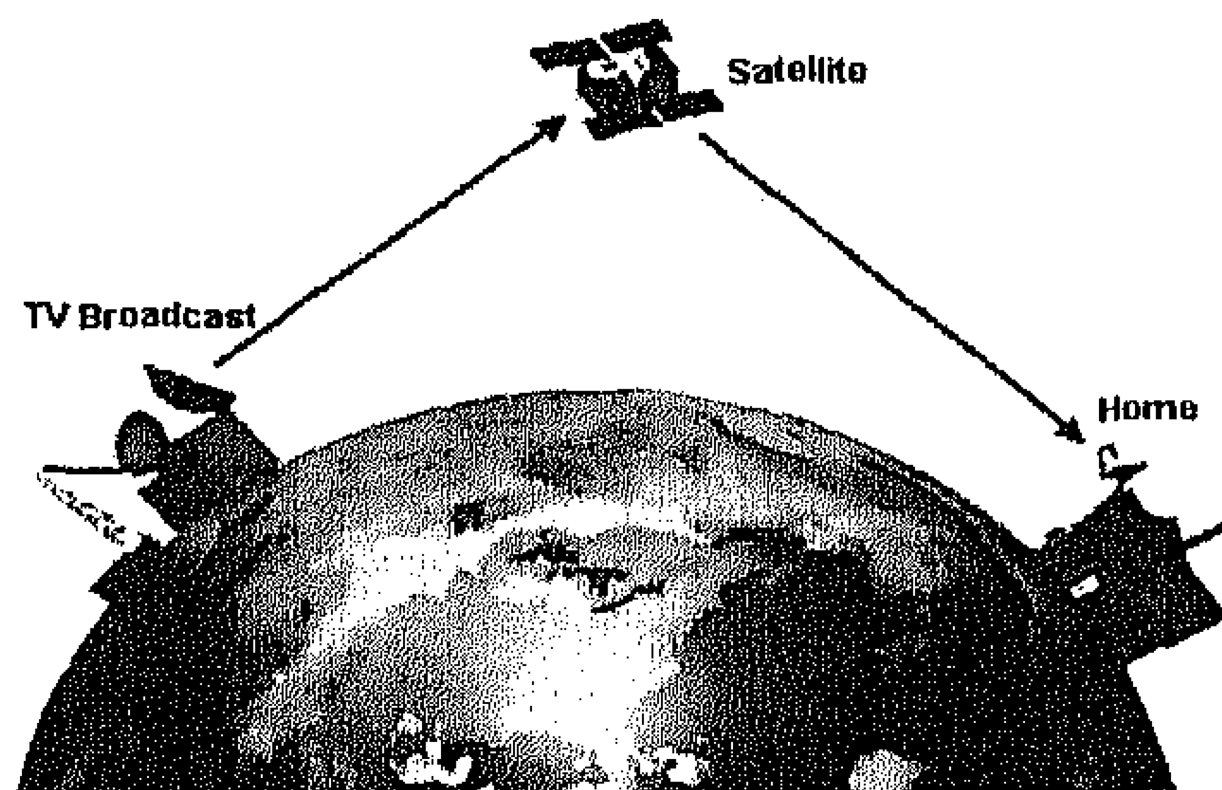
ويتراوح عدد المستجيبات التي تحملها الأقمار الصناعية بين عشرة مستجيبات إلى خمسين مستجيبا وذلك تبعا لكمية الطاقة الكهربائية التي يمكن للقمر توفيرها وتبعا لكمية الطاقة التي يستهلكها المستجيب الواحد. وفي أقمار المكالمات الهاتفية يتم تقليل قدرة المستجيبات وزيادة عددها لزيادة عدد المكالمات الهاتفية بينما في أقمار البث التلفزيوني يتم زيادة قدرة المستجيبات وتقليل عددها وذلك لتقليل قطر الصحون اللاقطة وبالتالي تقليل كلفة استقبالها في المنازل. ويتحدد عدد المكالمات الهاتفية والإشارات التلفزيونية التي يمكن للقمر نقلها أو بثها من عدد المستجيبات التي يحملها حيث يستطيع المستجيب الذي يبلغ عرض نطاقه في الغالب 36 ميغاهيرتز أن ينقل إشارة تلفزيونية واحدة أو ما يقرب من ألف مكالمة هاتفية باتجاه واحد في حالة استخدام التقنية التشابهية أما في حالة استخدام التقنية الرقمية فيمكن زيادة عدد الإشارات التلفزيونية والمكالمات الهاتفية إلى عشرة أضعاف. ويتحدد عدد المستجيبات التي يمكن للقمر حملها من كمية الطاقة الكهربائية التي تولدها الخلايا الشمسية والتي تعتمد على عدد ومساحة الخلايا الشمسية وكفاءتها في تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية ففي الستينات لم تتجاوز الطاقة الكهربائية المولدة خمسمائة واط وكفاءة الخلايا الشمسية الخمسة بالمائة ثم ارتفعت الطاقة إلى ألف واط والكفاءة إلى عشرة بالمائة في السبعينات وإلى ألفي واط وخمسة عشر بالمائة في الثمانينات وإلى أربعة آلاف واط وعشرين بالمائة في التسعينات وإلى ثمانية آلاف واط وخمسة وعشرين بالمائة بعد عام



2000م. وتستهلك معظم الطاقة الكهربائية التي تولدها الخلايا الشمسية من قبل المستجيبات التي تقوم بتحويل طاقة التيار المستمر إلى طاقة أمواج راديوية يتم بثها إلى الأرض. وتتراوح كمية الطاقة الراديوية التي يبثها المستجيب الواحد بين عدة عشرات من الواط في الأقمار المخصصة لنقل المكالمات الهاتفية ومائتي واط في أقمار البث التلفزيوني المباشر للمنازل. ومن المعروف أنه كلما زادت قدرة بث المستجيب كلما قل قطر صحن هوائي الاستقبال في المحطات الأرضية والذي أصبح الآن لا يتجاوز المتر في صحون استقبال البث التلفزيوني المباشر المستخدم في المنازل.

ويتحدد عمر القمر الافتراضي من كمية الغاز الذي يحمله فمع انتهاء كمية الغاز يصبح من الصعب الحفاظ على القمر في مداره الصحيح ويبلغ عمر الأقمار الصناعية الحديثة سبعة عشر عاما مقابل سبعة أعوام في الأقمار القديمة . ولقد تولت الهيئة الدولية للاتصالات الفضائية إنتلسات (INTELSAT) مهمة تأمين الاتصالات الدولية فيما بين جميع دول العالم وأطلقت الجيل الأول من أقمارها الصناعية المتزامنة في عام 1965م وجيلها الثامن في عام 1997م. وتتكون منظومة انتلسات من أسطول من الأقمار الصناعية يتكون حاليا من سبعة عشر قمرا موزعة على ثلاث مواقع تقع فوق المحيط الأطلسي والهندي والهادي ويمكن لأي دولة الاتصال ببقية دول العالم من خلال هوائيين موجهين لموقعين من هذه المواقع الثلاث ويبلغ عدد المستجيبات على القمر الواحد من أقمار الجيل الثامن 44 مستجيبا تقوم بنقل ثلاث قنوات تلفزيونية وخمسة وأربعون ألف دائرة هاتفية باتجاه واحد. وإلى جانب خدمة انتلسات قامت دول كثيرة باستخدام أقمار صناعية خاصة بها لتأمين اتصالاتها الداخلية والخارجية مع الدول المجاورة فقد أطلق الفرنسيون قمرهم في عام 1965م والكنديون في عام 1967م والألمان في عام 1969م واليابانيون والصينيون في 1970م والإنكليز في عام 1971م والهولنديون والأسبان في عام 1974م والهنود والأندونيسيون في عام 1976م والعرب والبرازيليون في عام 1985م والسويديون في عام 1986 والإسرائيليون في عام 1988م والباكستانيون والأرجنتينيون في عام 1990م والكوريون في عام 1992م والبرتغاليون في عام 1993م والأتراك في عام 1994م والماليزيون في عام 1996م. لقد تولت الأقمار الصناعية مهمة نقل المكالمات الدولية لما يزيد عن 25 عاما ولكن مع مد أول كيبل بحري باستخدام الألياف الضوئية يربط أميركا مع أوروبا بطول ستة آلاف كيلومتر وبسعة أربعين ألف مكالمة هاتفية بدأ التحول عن الأقمار الصناعية إلى كيبلات الألياف الضوئية لنقل المكالمات الهاتفية الدولية. ولكن هذا التحول لم يفقد الأقمار الصناعية أهميتها ففي مطلع الثمانينات بدأ استخدام الأقمار الصناعية المتزامنة لبث القنوات التلفزيونية مباشرة إلى المنازل من خلال مئات الأقمار التي تبث آلاف القوات التلفزيونية التشابهية والرقمية وفي نهاية التسعينات لتقديم خدمة الهاتف النقال وخدمة الإنترنت.

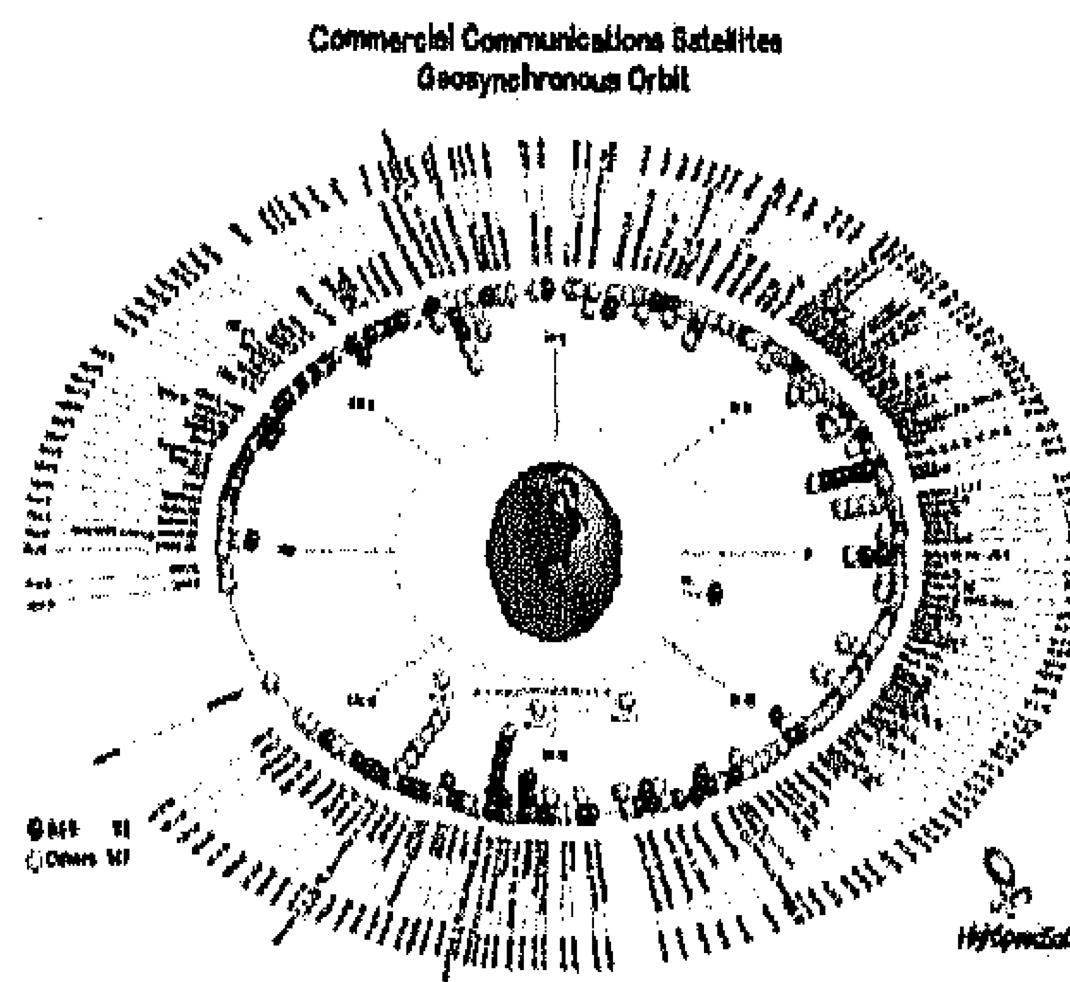
البث التلفزيوني من الأقمار الصناعية (TV Broadcast Satellite)



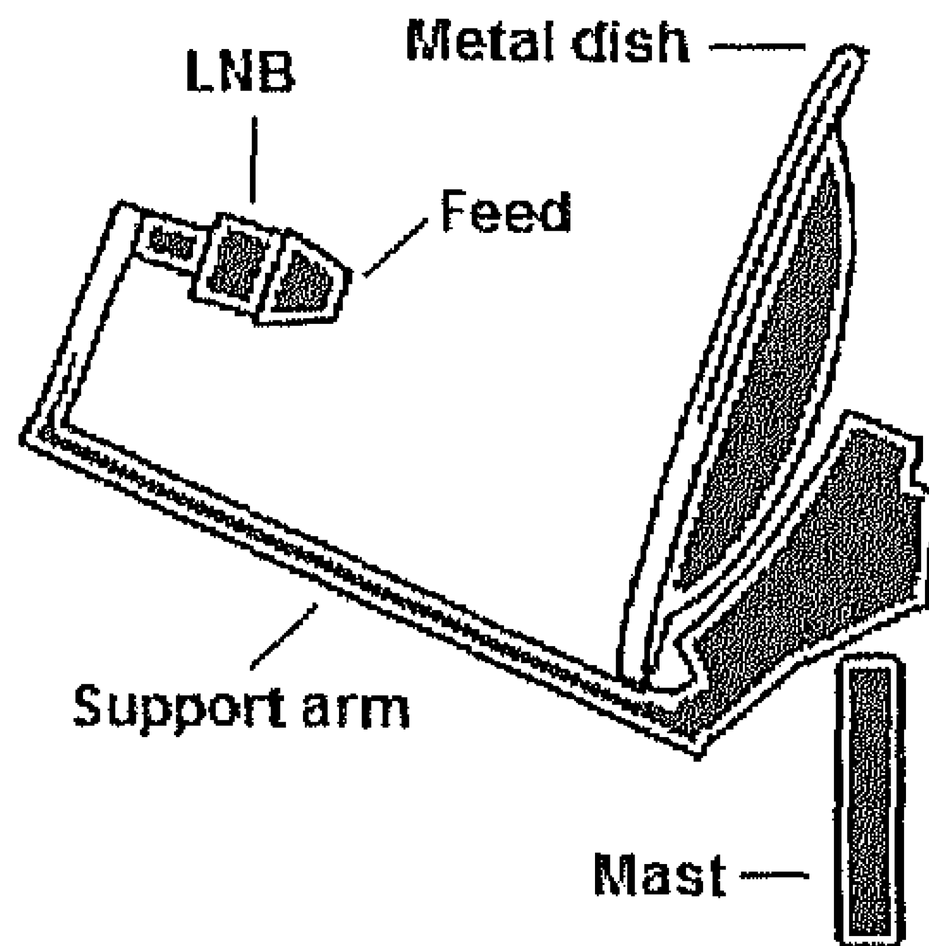
بدأت خدمة البث التلفزيوني المباشر من الأقمار الصناعية للمنازل بالظهور في منتصف الثمانينات بعد أن تم زيادة قدرة بث الأقمار الصناعية (transmitt power) نتيجة لرفع كفاءة الخلايا الشمسية وكذلك زيادة حساسية المستقبلات (receiver sensitivity). وأصبح البث التلفزيوني المباشر من الأقمار الصناعية إلى

المنازل في منتصف التسعينات منافسا قويا للبث التلفزيوني بالكبلات والبث التلفزيوني الأرضي وذلك لما يتمتع به من مزايا ليست موجودة في غيره من أنظمة البث. وتتلخص هذه المزايا في سهولة تركيبه ووصول بثه للمشترك أينما كان موقعه والحرية كذلك في اختيار القنوات التي يريدها من بين مئات القنوات المبثوثة من عشرات الأقمار الصناعية من خلال توجيه هوائيات المنازل نحو هذه الأقمار والتي تقع ضمن نطاق رؤيتها. يتكون نظام أقمار البث التلفزيوني المباشر من عدد كبير من الأقمار الصناعية الموضوعة في المدار الأرضي المتزامن (geosynchronous orbit) والذي يقع على ارتفاع 36000 كيلومتر عن سطح الأرض لكي تبدو ثابتة بالنسبة للمنطقة الجغرافية المقابلة لها على الأرض. ويبلغ عدد أقمار البث التلفزيوني المباشر الآن ما يزيد عن مائة قمر صناعي موزعة على المدار المتزامن تخدم البث التلفزيوني لمختلف دول العالم ويوجد للعرب منها قمران تغطيان المنطقة العربية وهما القمر العربي (Arab Sat) والقمر المصري أو ما يسمى بقمر النيل (Nile Sat). وقد أطلق الجيل الأول من القمر العربي في عام 1985م بينما أطلق الجيل الأول من قمر النيل في عام 1998م. ويبث الجيل الأخير من القمر العربي 400 قناة تلفزيونية و160 قناة صوتية بينما يبث القمر المصري 470 قناة تلفزيونية و 104 قناة صوتية. ويوجد في الغالب على كل قمر من هذه الأقمار عشرات المعيدات (Transponders) حيث يمكن لكل واحد من هذه المعيدات استقبال ما يزيد عن عشرة قنوات تلفزيونية من محطات بث أرضية باستخدام التقنية الرقمية ومن ثم يعيد بثها بقدرة كافية إلى الأرض. وتتراوح قدرة الإرسال (transmit power) التي يبثها المعيد الواحد إلى الأرض ما بين 120 و240 واط وهي أعلى منها في بقية أنواع الأقمار الصناعية.

ويتم التقاط الإشارات في المنازل بهوائيات صحنية (dish antennas) لا يتجاوز قطرها المتر الواحد ومن ثم يقوم مستقبل خاص بقنوات الأقمار الصناعية باختيار القناة التلفزيونية المناسبة من بين مئات القنوات التي تم التقاطها وإرسالها إلى جهاز التلفزيون. وبسبب الكسب العالي للهوائيات الصحنية فإنها لا تستقبل إلا إشارات الأقمار الواقعة ضمن زاوية نظرها الضيقة جدا ولذا يلزم إعادة توجيهها لاستقبال بث أقمار أخرى. ومع التحول من البث التماثلي إلى البث الرقمي في منتصف التسعينات تم زيادة عدد القنوات التي تبثها هذه الأقمار إلى أكثر من عشرة أضعاف ما هي عليه في السابق مع الحصول على درجات نقاء ووضوح عاليتين في الصوت والصورة وذلك بسبب استخدام التقنية الرقمية المقاومة للضجيج والتداخل والقابلة للضغط. ويزيد عدد أقمار البث التلفزيوني المباشر اليوم عن مائة قمر موزعة على المدار المتزامن بحيث تغطي مناطق جغرافية مختلفة على سطح الأرض وتبث آلاف القنوات التلفزيونية لمختلف الأغراض والأهداف بعضها متاح للجميع وبعضها تم تشفيره بحيث لا يمكن التقاطه إلا بعد الحصول على معدات لفك التشفير من الشركات المعنية. يتكون نظام الاستقبال في البيوت من هوائي صحني (Dish antenna) يقوم بعكس الموجات الكهرومغناطيسية التي تسقط عليه من القمر المعني وتركيزها في بؤرة الصحن (dish focal point). ويثبت في بؤرة الصحن لاقط مكون من هوائي بوقي (feed horn antenna) ومن مستقبل أولي منخفض الضجيج ((low noise block (LNB)). ويعود السبب في وضع المستقبل الأولي في بؤرة الصحن لسببين رئيسين



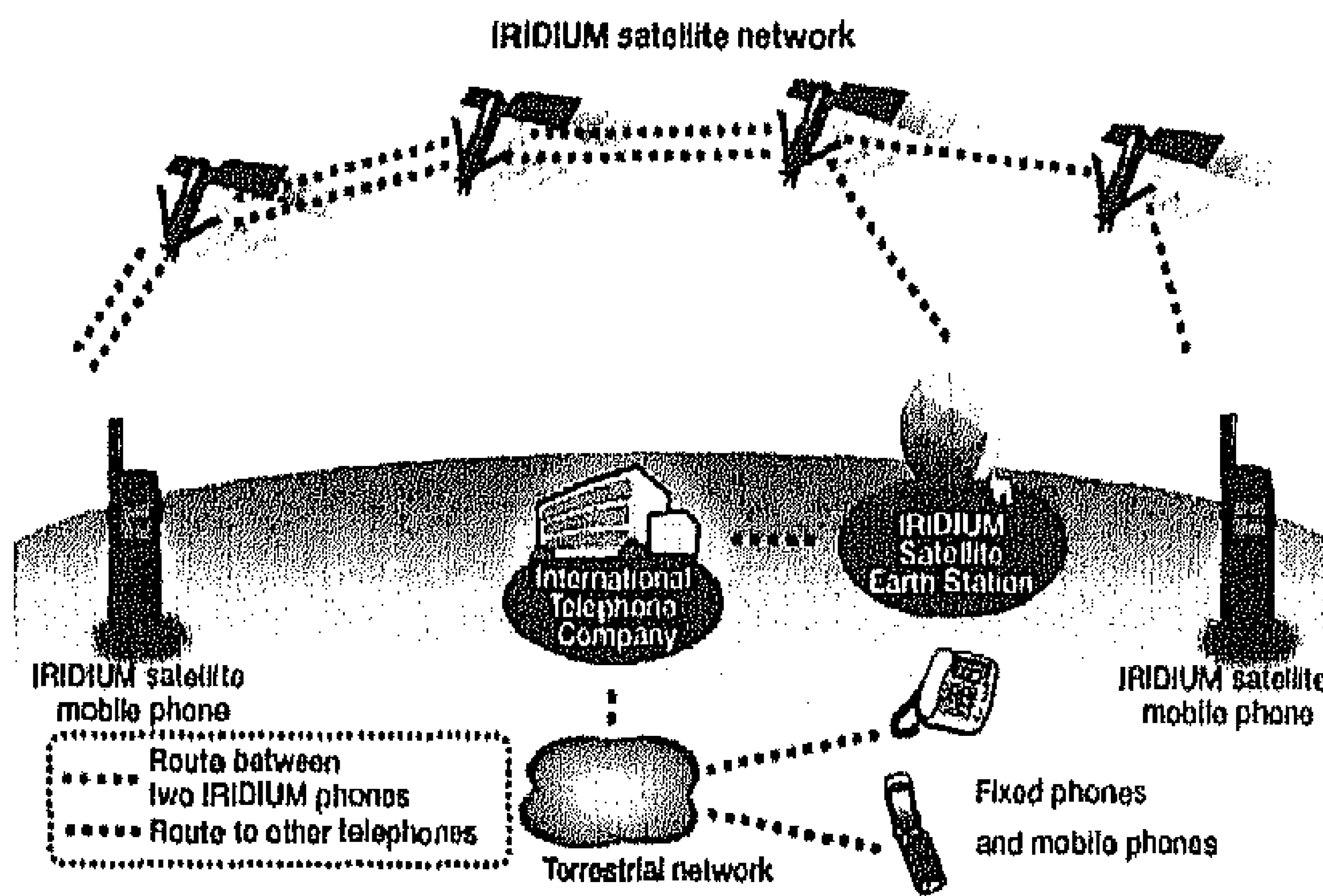
أولهما أن الكوابل المحورية لا يمكنها نقل الترددات العالية للإشارة القادمة من القمر بسبب الفقد العالي ولذا يقوم هذا المستقبل بتحول االإشارة إلى إشارة بتردد منخفض نسبيا بحدود ألف ميجاهيرتز يمكن نقله باستخدام الكوابل المحورية بفقد قليل (low loss). أما السبب الثاني فهو أن الإشارة التي يلتقطها القمر تكون بالغة الضعف ولذا يلزم تضخيمها قليلا بمضخم منخفض الضجيج (low noise amplifier) حيث أنها تتعرض لكميات كبيرة من الضجيج عند نقلها بالكوابل المحورية من أسطح المنازل إلى داخلها. ويتم استرجاع القنوات التلفزيونية من الإشارات القادمة من المستقبل الأولي باستخدام مستقبل رئيسي يتم وضعه قريبا من التلفزيون حيث يقوم بتضخيم الإشارة بشكل كبير بعدة مراحل من المضخمات عالية الكسب ومن ثم إجراء عمليات التعديل العكسي (Demodulation) وفصل القنوات عن بعضها البعض (Demultiplexing) وتغذية واحدة من هذه القنوات إلى التلفزيون. وقد تم تخصيص عدة نطاقات للبث التلفزيوني المباشر من الأقمار الصناعية وهي جزء من نطاق السي (C-band) يمتد من 3.7 إلى 4.2 جيقاهيرتز وجزء من نطاق الكيو (Ku-band) يمتد من 11.7 إلى 12.2 جيقاهيرتز. وقد قل استخدام نطاق السي بسبب حاجته إلى صحون كبيرة يتجاوز قطرها المتر بينما لا يتجاوز القطر النصف متر عند استخدام نطاق الكيو ولذلك شاع استخدام هذا النطاق رغم عيبه الرئيسي وهو تعرض الإشارة لفقد كبير عند وجود الأمطار والثلوج.



الأقمار الصناعية لخدمة الهواتف المتنقلة

بدأ التفكير في استخدام الأقمار الصناعية لتوفير الخدمة الهاتفية للمستخدمين المتجولين الذين لا يمكنهم استخدام الشبكة الهاتفية العامة بسبب بعدهم عنها مع بداية ظهورها في بداية الستينات من القرن العشرين. وكان أكثر المستخدمين حاجة لمثل هذه الخدمة هم قباطنة السفن المدنية والحربية بسبب طول مكثهم في البحار والمحيطات وبعدهم عن مراكز الخدمة الهاتفية العامة. وفي عام 1976م وضعت الولايات المتحدة الأمريكية ثلاثة أقمار صناعية في المدار المتزامن بحيث تغطي جميع أنحاء الكرة الأرضية باستثناء القطبين وهي أقمار ماريسات (Marisat). ووفرت هذه الأقمار الخدمة الهاتفية في الأساس للبحرية الأمريكية ولكنها سمحت باستخدامها فيما بعد للسفن التجارية وقد توقف آخر هذه الأقمار عن العمل في عام 2008م بعد خدمة دامت 32 عاما وهو أطول عمر سجله قمر صناعي. وفي عام 1990م قامت المنظمة العالمية للبحار التابعة للأمم المتحدة بتوفير الخدمة الهاتفية لجميع أنواع السفن من خلال وضع ثلاثة أقمار في المدار المتزامن وهي أقمار انمارسات (Inmarsat) وكانت تعمل بشكل غير ربحي إلى أن تم خصخصتها في عام 1999م لتقوم بتخديم الخدمة الهاتفية لأي مستخدم متجول بما فيهم الأشخاص من خلال أسطول من الأقمار الصناعية مكون من اثني عشر قمرا متزامنا. وفي السنوات الأخيرة أصبح بإمكان المستخدمين الدخول إلى الشبكة العنكبوتية من خلال أقمار انمارسات بعد أن قامت بعمل شبكة رقمية خاصة بها مكونة من أقمارها ومحطاتها الأرضية تم ربطها بالشبكة الهاتفية العامة والشبكة العنكبوتية.

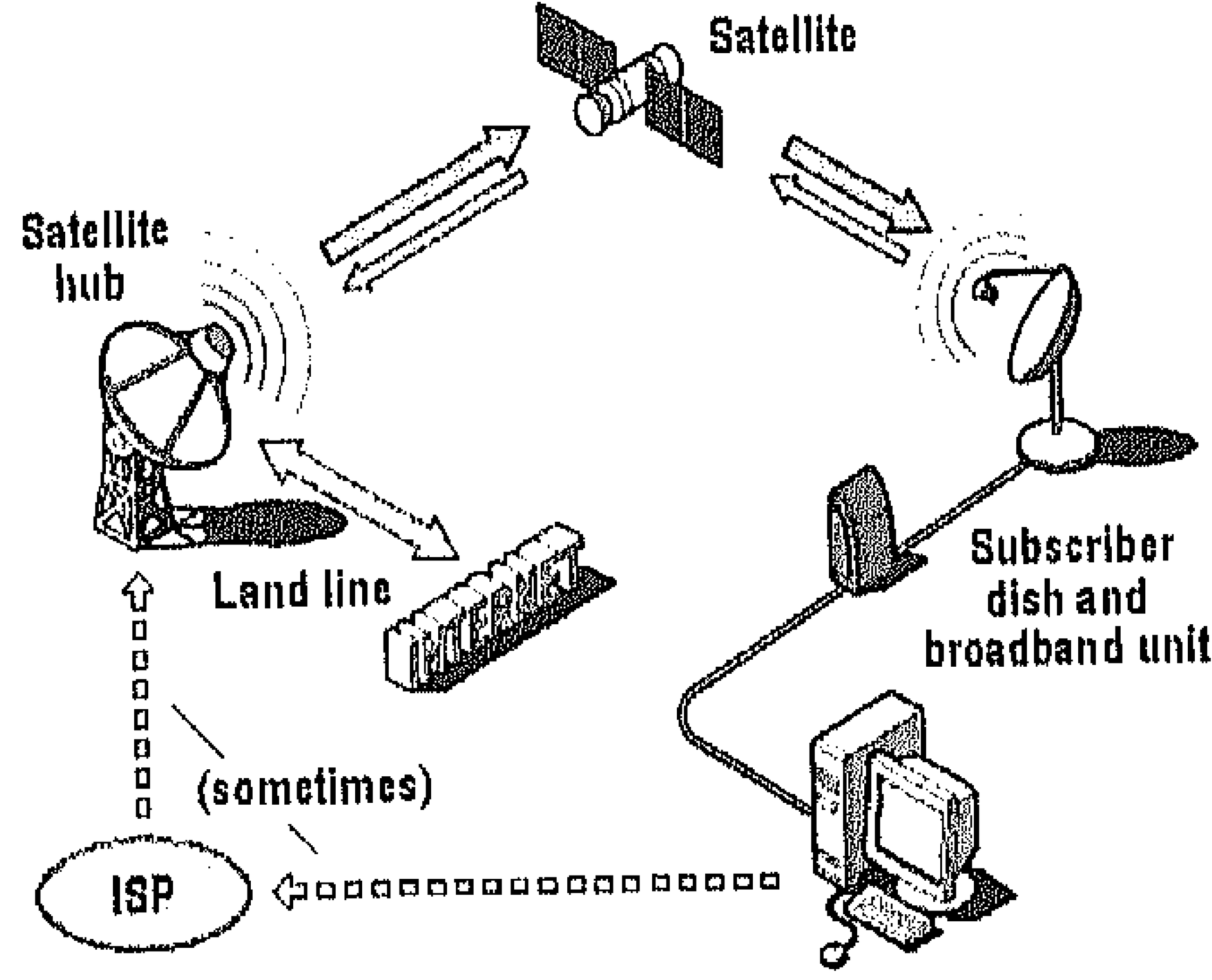
وفي منتصف التسعينات بدأ العمل على استخدام الأقمار الصناعية غير المتزامنة ذات المدارات المنخفضة والمتوسطة كمحطات قاعدية (Base stations) متحركة بدلا من المحطات القاعدية الأرضية في أنظمة الهواتف الخلوية. ويعود السبب في عدم استخدام الأقمار المتزامنة في هذه الأنظمة لعدم قدرتها بسبب بعدها الكبير على التقاط إشارات الهواتف الخلوية التي يجب أن لا تتجاوز طاقة بثها واطا واحدا حفاظا على صحة حاملها من الإشعاعات. ولكن مع التقدم الكبير في السنوات الأخيرة في تقنيات الأقمار الصناعية كزيادة حساسية المستقبلات وزيادة قدرة بث المرسلات وزيادة أحجام الهوائيات أصبح بالإمكان استخدام الأقمار المتزامنة في خدمة الهواتف المتنقلة. أما الأقمار المنخفضة فبإمكانها التقاط إشارات الهواتف الخلوية الضعيفة لقربها من الأرض إلا أن عيبها في كونها لا تظهر في سماء المنطقة إلا لفترة زمنية محددة يعتمد طولها على ارتفاع القمر ولذلك يلزم لتأمين الاتصالات بشكل دائم وضع عدد كافي من الأقمار في عدة مدارات وتوزع أقمار المدار الواحد على محيطه بانتظام بحيث كلما غاب أحدها طلع القمر الذي يليه فيتم تحويل المكالمات تلقائيا إليه كما يحدث عند تحويل مكالمات المشتركين عند تنقلهم بين المحطات القاعدية في نظام الهواتف الخلوية الأرضية. لقد قامت عدة شركات عالمية ببناء مثل هذه الأنظمة أشهرها نظام شركة "موتورولا" المسمى إرديوم (Irdium) والذي يتكون من 66 قمر موزعة على ستة مدارات دائرية فوق قطبية (11 قمر في كل مدار على ارتفاع 780 كيلومتر) ويشع كل قمر 48 شعاع يغطي كل شعاع خلية بمساحة أرضية يبلغ قطرها 150 كيلومتر ويستطيع القمر الواحد معالجة 1100 مكالمة هاتفية في آن واحد حيث يقوم باستلام المكالمة من الأرض فيتعرف على عنوانها فيبثها إلى نفس المنطقة التي يغطيها إن كانت محلية أو يحولها إلى أحد الأقمار المجاورة ليتولى أمرها حتى يوصلها إلى عنوانها. ومن الأقمار الصناعية ذات المدارات المنخفضة التي تقوم بتقديم خدمة الهواتف المتنقلة عالميا أقمار جلوبل ستار (Globalstar) الأمريكية والتي تتكون من 48 قمرا موزعة على عدة مدارات بارتفاع 1400 كيلومتر وبدأت بتقديم الخدمة في عام 2000م. ومن أمثلة الأقمار الصناعية المتزامنة المستخدمة في خدمة الهواتف المتنقلة قمر الثريا والذي يوفر خدمة الهواتف المتنقلة بين مشتركيه الواقعين ضمن تغطيته وهي منطقة الشرق الأوسط وشمال ووسط أفريقيا وأوروبا وبعض مناطق أسيا وأستراليا.



الأقمار الصناعية لخدمة الإنترنت (Internet Satellite)

قامت إحدى الشركات الأمريكية في عام 1996م بأول محاولة لتوفير خدمة الإنترنت من خلال الأقمار الصناعية باستخدام نظامها المسمى (DirecPC). وفي هذا النظام يقوم المستخدم بطلب المعلومات من خلال مودم مرتبط سلكيا بمقدم خدمة الإنترنت ولكن المعلومات يتم تزويدها عن طريق الأقمار الصناعية من خلال صحون لاقطة تغذي إشاراتها للمستقبل المرتبط بالحاسوب الشخصي. ويعود السبب في استخدام القمر

الصناعي بدلا من الأسلاك لتحميل المعلومات إلى ارتفاع معدل التنزيل حيث يصل إلـــى 400 كيلوبـــت فـــي الثانية في حالة القمر مقابل 64 كيلوبت في الثانية في حالة الأسلاك. وفي عام 2000م قامت شركة أمريكيـــة أخرى بتوفير خدمة الإنترنت من خلال الأقمار الصناعية للمستخدمين في أمريكا الشمالية بحيث تـــتم عمليـــة طلب المعلومات وتحميلها من خلال القمر دون الحاجة للأسلاك. وفي هذا النظام المسمى (StarBand) يـــتم طلب المعلومات بمعدل 256 كيلوبـــت فـــي الثانيـــة



وتنزيلها بمعدل 1500 كيلوبت في الثانيـــة باســـتخدام صحون لاقطة لا يتجاوز قطرها المتر. وفـــي عـــام 2007م تم توفير خدمة الإنترنت من خـــلال الأقمـــار الصناعية للمستخدمين في الدول الأوروبية من خـــلا النظام المسمى (tooway) حيث تبلغ سرعة الوصـــلة الصاعدة (uplink) 384 كيلوبت في الثانية وســـرعة الوصلة النازلة (downlink) أي ســـرعة التحميـــل 3600 كيلوبت في الثانية. ويمكن الحصول على خدمة الإنترنت فضائيا في أي مكان في العـــالم مـــا عـــدا القطبين من خلال أقمار انمارسات (Inmarsat) المتزامنة باستخدام معدات محمولة ولكنها غالية الثمن وتبلـــغ سرعة الوصلة النازلة 492 كيلوبت في الثانية وما بين 300 و 400 كيلوبت في الثانية للوصلة الصاعدة.

6-11 الاستخدامات الأخرى للأقمار الصناعية

لقد كان الهدف الرئيسي من إطلاق الأقمار الصناعية هو تأمين الاتصالات فيما بين القارات إلا أنـــه تبين للعلماء إمكانية استخدامها في تطبيقات كثيرة لا تقل أهمية عن تطبيقـــات الاتصـــالات بـــل إن بعـــض التطبيقات ما كان لها أن تظهر بدون الأقمار الصناعية. ومن هذه التطبيقات للأقمار الصناعية أقمار تحديـــد الموقع العالمي وأقمار الأرصاد الجوية وأقمار التجسس وأقمار الاستشعار عن بعـــد والأقمـــار المســـتخدمة لأغراض الأبحاث العلمية.

نظام تحديد الموقع العالمي ((Global Positioning System (GPS

بفضل الأقمار الصناعية أصبح تحديد الموقع والاتجاه يتم بدقة متناهية باستخدام نظام تحديد الموقـــع العالمي الذي يحدد خط الطول (longitude) وخط العرض (latidude) والارتفاع (elevation) فـــي أي مكان على سطح الكرة الأرضـــية. وقـــد قامـــت وزارة الدفاع الأمريكية ببناء هذا النظام ابتـــداءا من عام 1978م بإطلاق أول قمر صناعي مـــن منظومة الأقمار الصناعية المزمع إطلاقها وفـــي عام 1994م تم إطلاق آخر قمر منهـــا والبـــالغ عددها 24 قمرا. وكان الهدف مـــن بنـــاء هـــذا النظام في البداية للأغراض العسكرية إلا أنه بعد

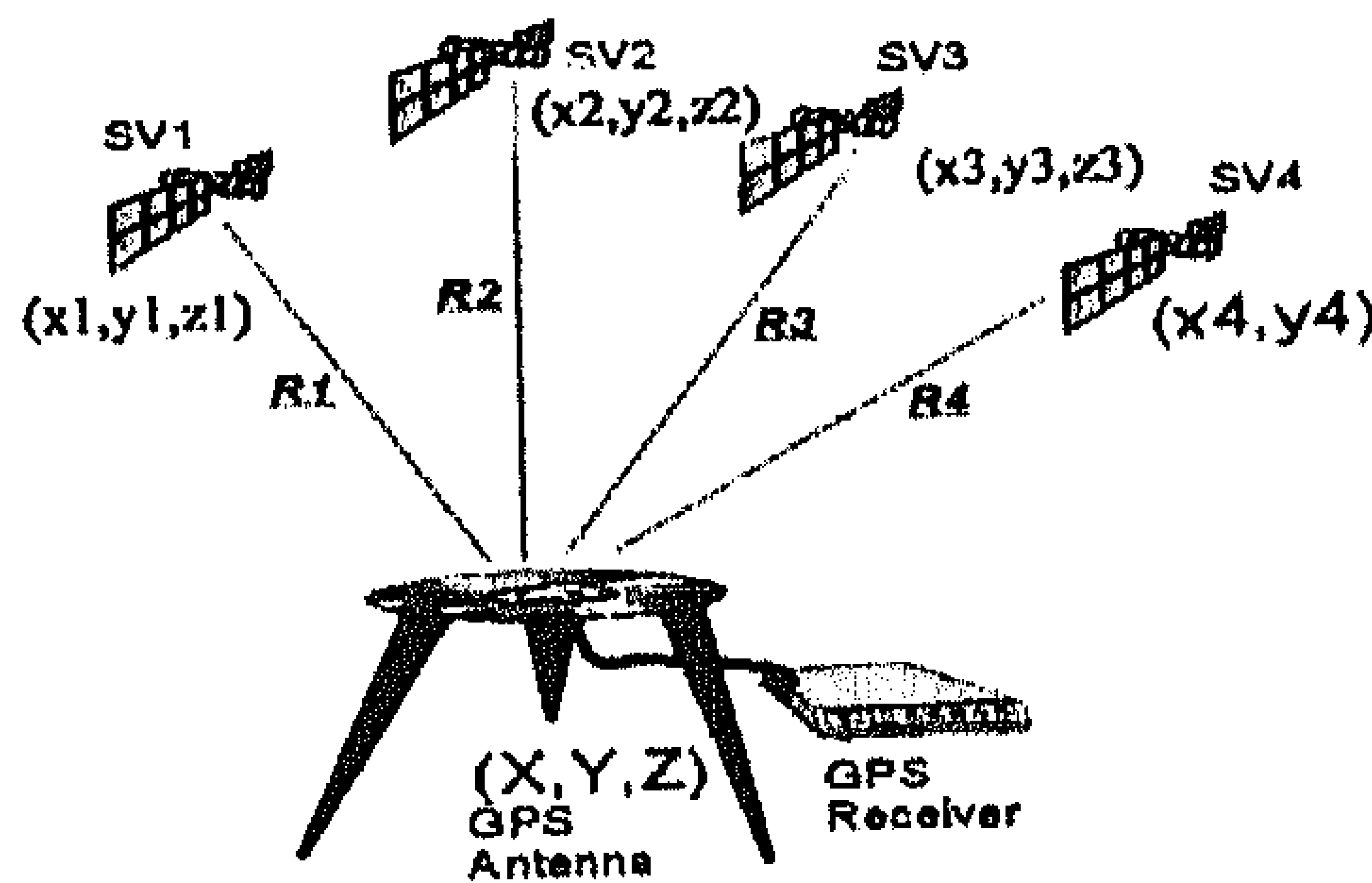
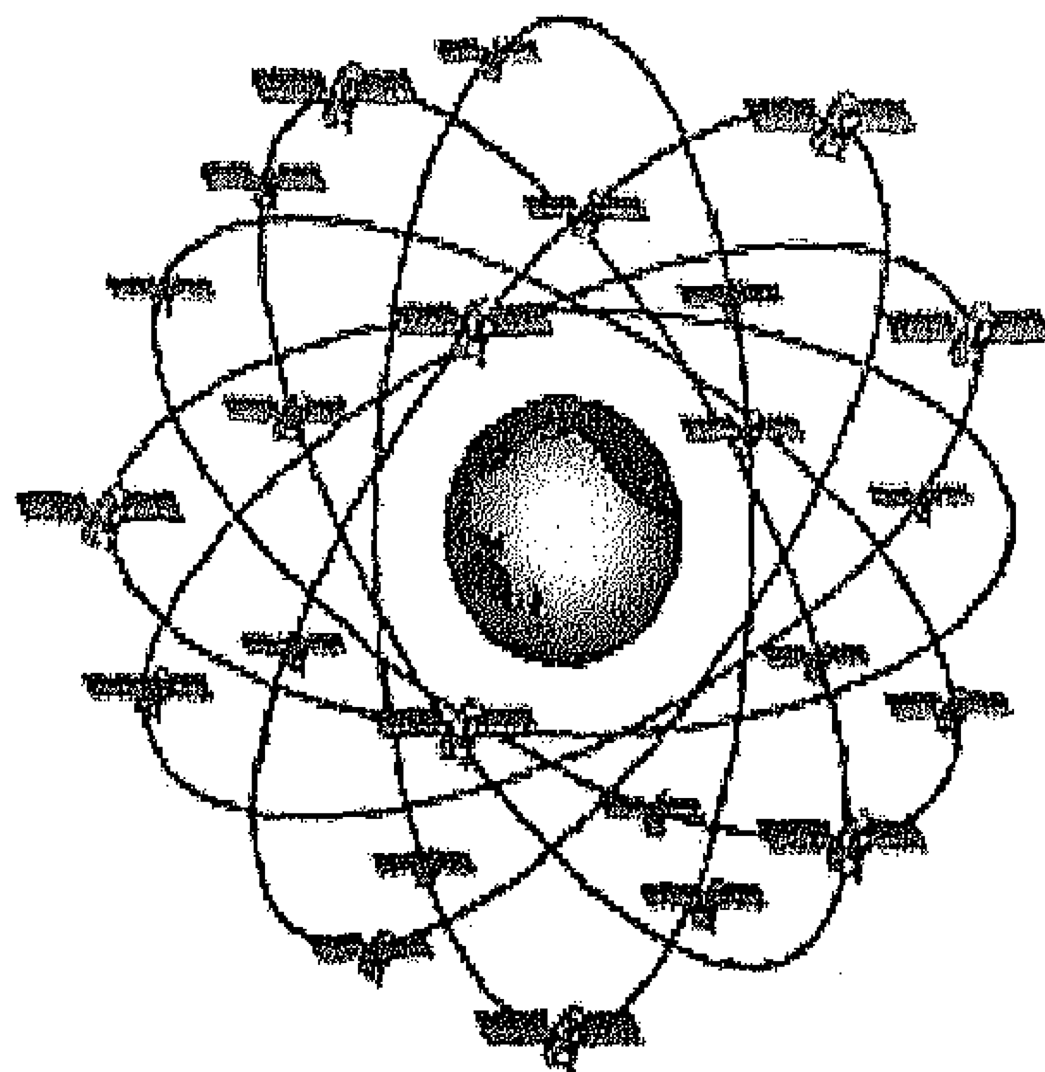


Fig.3: Calculation of Position

سنوات معدودة أتيح استخدامه للأغراض المدنية وبدون مقابل ولكن بإمكانات لتحديد الموقع أقل من تلك المخصصة للأغراض العسكرية. وتتكون منظومة تحديد الموقع العالمي من 24 قمرا صناعيا تم توزيعها في ستة مدارات دائرية متوسطة (MEO) على ارتفاع 19308 كيلومتر فوق سطح الأرض وعند مثل هذا الارتفاع يكمل القمر دورته في 12 ساعة تقريبا. وقد تم اختيار ميل المدارات عن خط الاستواء وكذلك توزيع الأقمار فيها بحيث يظهر في سماء أي منطقة من الأرض أربعة أقمار على الأقل في نفس الوقت. وتقوم عدة محطات أرضية موزعة في أماكن محددة من الكرة الأرضية بالمراقبة والتحكم بالأقمار الأربعة والعشرين.

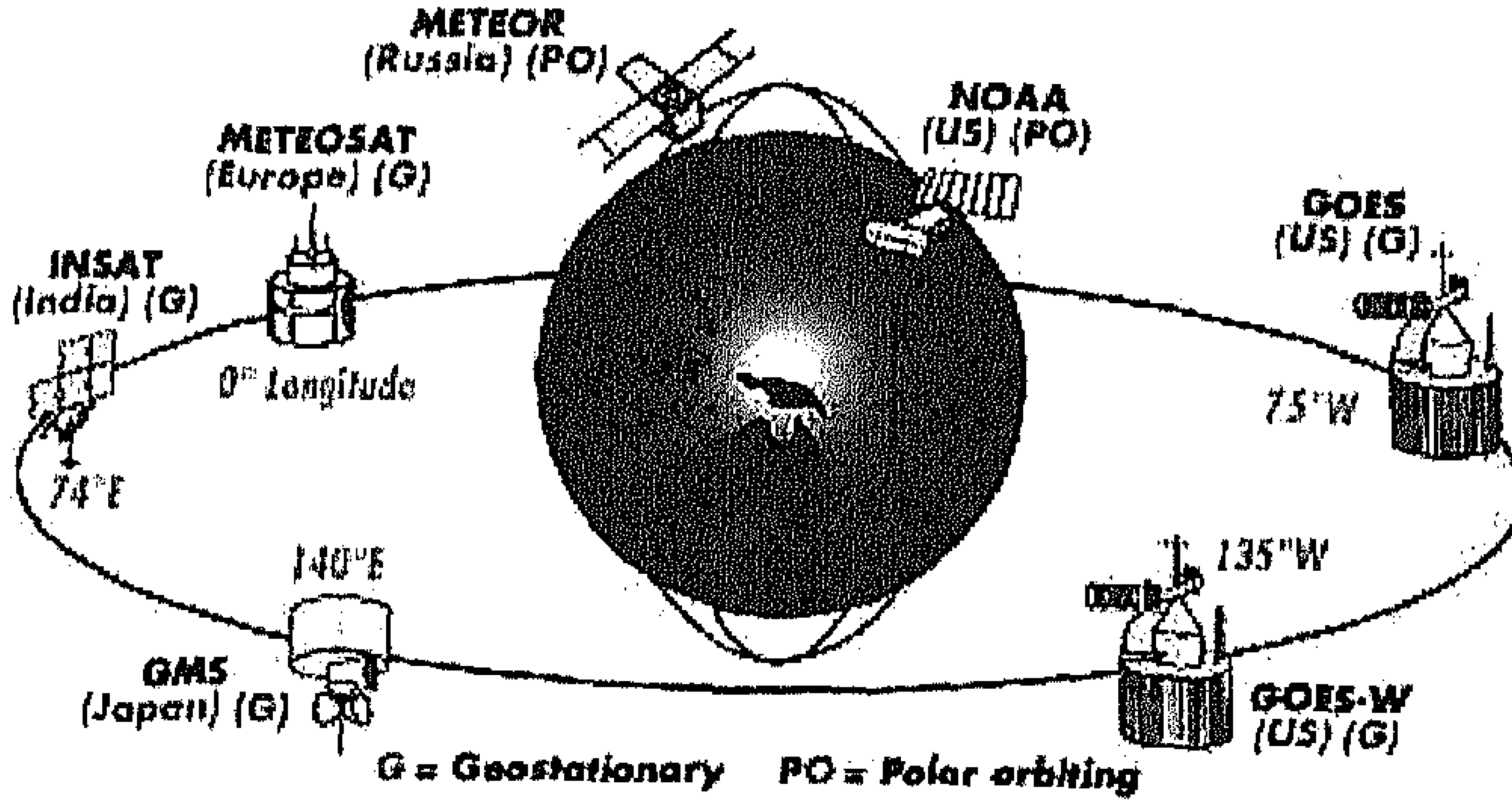
وتقوم هذه الأقمار ببث إشارات توقيتية بشكل منتظم إلى الأرض وبطريقة رقمية بمعدل 50 نبضة في الثانية. وتحتوي هذه الإشارات على معلومات محددة وهي رقم القمر وإحداثياته في كل لحظة زمنية وكذلك الوقت والتاريخ الحاليين (time and date). ويمكن استقبال بعض هذه الإشارات بجهاز إلكتروني بسيط يقوم بحساب إحداثيات الموقع سواء كان في البر أو البحر أو الجو مستفيدا من التأخير الزمني (time delay) بين الإشارات المستلمة. وتبث الأقمار الصناعية معلوماتها باستخدام الموجات الدقيقة (microwave) وبالتحديد عند التردد 1575.42 MHz ويلزم توفر ما يسمى بخط النظر بين القمر وجهاز الاستقبال (Line of sight) لكي يعمل الجهاز بشكل صحيح. ويمكن للجهاز حساب خط الطول وخط العرض من خلال الإشارات المرسلة من ثلاثة أقمار صناعية فقط بينما يلزم تحديد الإرتفاع إلى جانب خطي الطول والعرض إلى إشارات قادمة من أربعة أقمار أو أكثر. ويبلغ مقدار الخطأ في تحديد مكان الموقع في هذا النظام عشرة أمتار في الاتجاه الأفقي أي خطي الطول والعرض وثلاثين مترا في الاتجاه الرأسي أي الارتفاع. ولكن هذه الدقة في تحديد الموقع غير متاحة للمستخدمين المدنيين بعد عام 2000م حيث قام مالك هذا النظام وهي وزارة الدفاع الأمريكية بإحداث أخطاء مقصودة في تحديد إحداثيات الموقع بحيث أصبح مقدار الخطأ مائة متر وذلك تجنبا لاستخدام النظام من قبل الأعداء في تحديد الأهداف العسكرية الأمريكية والحليفة لها.



وإلى جانب خدمة تحديد الموقع يقوم النظام بتزويد أجهزة الاستقبال بالوقت بشكل دقيق وكذلك التاريخ حيث يوجد على الأقمار ساعات ذرية (atomic clocks) بالغة الدقة تصل دقتها إلى نانوثانية. ويمكن للأجهزة المزودة ببعض البرمجيات تحديد سرعة واتجاه وكذلك رسم مسار الوسيلة الحاملة لهذا الجهاز من خلال تخزين إحداثيات المواقع التي تمر بها هذه الوسيلة سواء كانت شخصا أو مركبة أو سفينة أو طائرة. ويوجد في بعض أجهزة تحديد الموقع خرائط لأماكن مختلفة على سطح الأرض وخاصة المدن بحيث تقوم البرمجيات بإظهار موقع الجهاز بدقة على هذه الخرائط ورسم المسار الذي تسلكه عليها. وحديثا تم تزويد كثيرا من الأجهزة الخلوية بخدمة تحديد الموقع العالمي مع ما يلزم من خرائط للمدن تحدد عليها موقع الحامل لها. ولقد تم استخدام نظام تحديد الموقع في تطبيقات لا حصر لها ففي التطبيقات العسكرية تم استخدام النظام لتحديد مواقع الأهداف العسكرية وتوجيه الطائرات والصواريخ لضرب هذه الأهداف. وفي التطبيقات المدنية تم استخدامه لتحديد مواقع السفن والطائرات والشاحنات والمركبات والسيارات وحتى الأشخاص ومساعدتها في الوصول إلى وجهاتها.

الأقمار الصناعية للأرصاد الجوية (Weather Satellite)

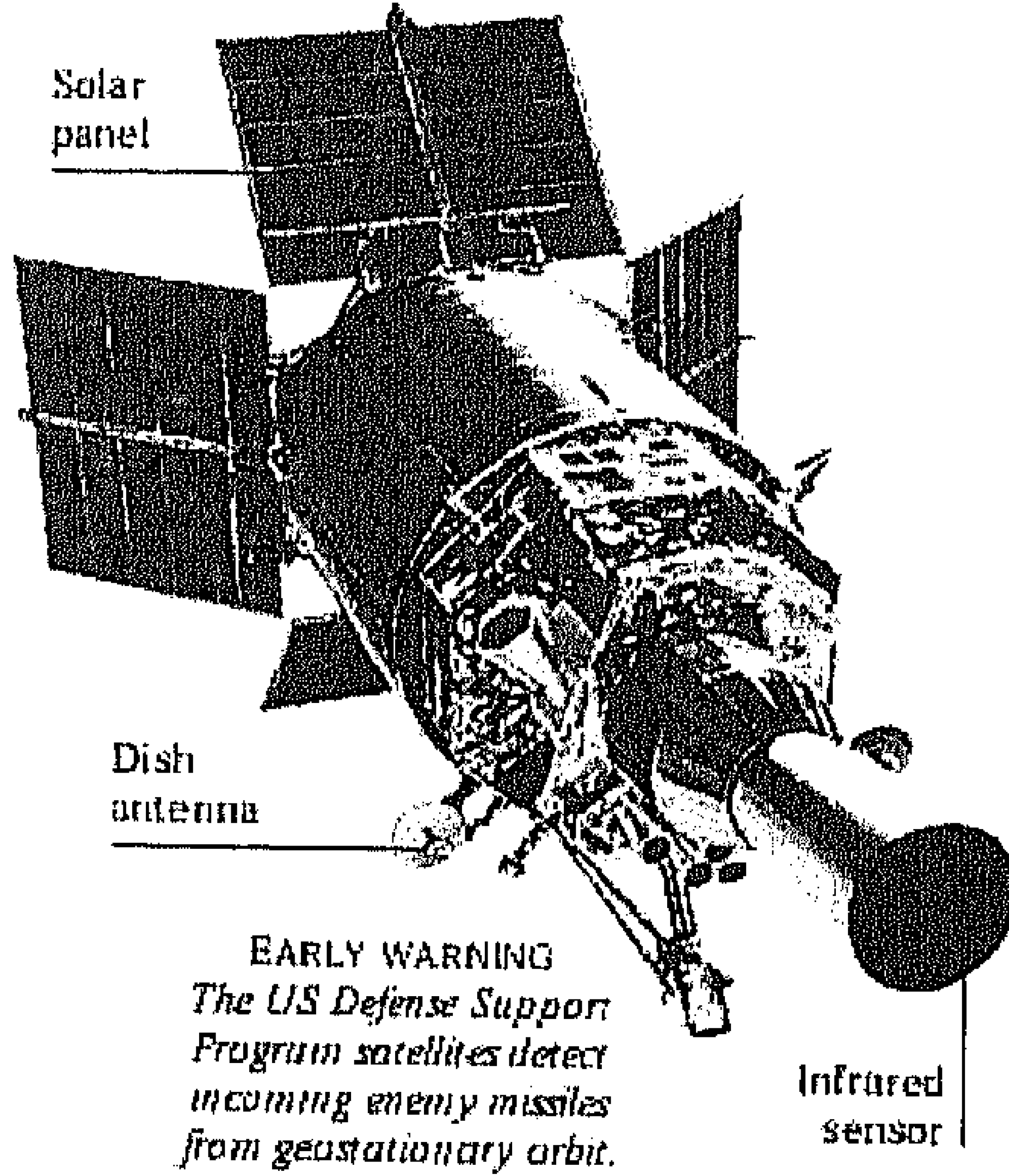
تستخدم أنظمة الأرصاد الجوية شبكة من الأقمار الصناعية تقوم بجمع كميات ضخمة من الصور والبيانات عن الحالة الجوية في مختلف مناطق العالم فيتم إرسالها إلى دوائر الرصد الجوي التي تقوم بمعالجتها وتوزيعها على الجهات المعنية لأخذ الاحتياطات اللازمة لمواجهة الظروف الجوية والتقليل من عواقب الكوارث الطبيعية وحوادث الطائرات والسفن والقطارات والمركبات. ولا يقتصر دور هذه الأقمار على مراقبة الحالة الجوية بل يتعداها لمراقبة العواصف الرملية والتيارات البحرية والغطاء النباتي للأرض والغطاء الجليدي وحرائق الغابات ومستويات التلوث في البر والبحر والجو والبراكين وغيرها الكثير. وتستخدم هذه الأقمار أنواع مختلفة من الكاميرات الخاصة يلتقط بعضها صورا باستخدام الضوء المرئي (visible light) وبعضها باستخدام الأشعة تحت الحمراء (infrared cameras) إلى جانب أنواع مختلفة من الحساسات (sensors) التي تقيس درجة حرارة سطح الأرض. ويتم أخذ الصور لسطح الأرض من خلال عملية المسح (scanning) وتصل دقة التمييز للصور المأخوذة (image resolution) في معظم أقمار االطقس إلى عدة كيلومترات.



وتستخدم الأرصاد الجوية نوعين من الأقمار الصناعية وهي الأقمار الصناعية المتزامنة (geostationary) والتي تراقب الحالة الجوية بشكل مستمر للمناطق التي تقع تحت نطاق رؤيتها وفي هذا الحال يلزم وجود ثلاثة أقمار متزامنة لمراقبة مناخ كامل سطح الأرض باستثناء مناطق القطبين. أما الأقمار الصناعية القطبية (polar orbiting) فهي تقوم بجمع البيانات عن حالة الجو لكامل سطح الأرض في كل اثنتي عشرة ساعة إذا ما وضعت على ارتفاع 700 كيلومتر عن سطح الأرض حيث يكمل القمر دورته حول الأرض في زمن لا يتجاوز الساعتين. وقد أطلقت الولايات المتحدة الأمريكية في عام 1960م أول قمر صناعي لأغراض الأرصاد الجوية وهو القمر تايروس - 1 (TIROS-1) والذي كان يحمل كاميرتين تلفزيونيتين لالتقاط صور لجو الأرض من ارتفاع 700 كيلومتر. وبانتهاء برنامج تايروس في عام 1964م بدأت الولايات المتحدة الأمريكية برنامج نيمبوس (NIMBUS) والذي استمر حتى عام 1978م بعد طلاق سبعة أقمار منها وهي تحمل بجانب الكاميرات التلفزيونية حساسات للأشعة تحت الحمراء لقياس درجة حرارة سطح الأرض. وفي عام 1975م أطلقت الولايات المتحدة الأمريكية أول أقمارها المتزامنة لأغراض الأرصاد الجوية في برنامجها المسمى (GOES) وهو المستخدم الآن في توفير المعلومات للنشرات الجوية وقد أطلق الجيل الرابع عشر منها في عام 2009م. وتمتلك دول أخرى أقمار لأعراض الأرصاد الجوية كالاتحاد الأوروبي وقمره (Meteosat) وروسيا وقمرها (Meteor) واليابان وقمرها (GMS) والهند وقمرها (Insat) وقد تم وضع بعضها في مدارات منخفضة والبعض في مدارات متزامنة.

الأقمار الصناعية لأغراض التجسس (Spying Satellite)

لقد كان أول استخدام للأقمار الصناعية منذ ظهورها في عام 1957م لأغراض التجسس حيث أطلقت الولايات المتحدة الأمريكية في عام 1960م أول قمر للتجسس في برنامجها المسمى كورونا (Corona) والذي استمر حتى عام 1972م بعد إطلاق ما يقرب من مائة قمر وجمعت ما يقرب من مليون صورة. وغالبا ما يتم وضع أقمار التجسس في مدارات قطبية منخفضة لا تتجاوز مائتي كيلومترات وذلك لكي تتمكن من تصوير أي منطقة على سطح الكرة الأرضية ولأخذ صور واضحة للأهداف المنشودة. ولكن مثل هذه الأقمار المنخفضة لا يمكنها البقاء لمدد طويلة في مداراتها بسبب تباطؤ سرعتها نتيجة لاحتكاكها بالهواء ولذلك يتم استرجاعها في غضون أشهر معدودة. وكانت هذه الأقمار تحمل كاميرات تصوير عادية بلغت دقة تميزها في بداية البرنامج عشرة أمتار وفي نهايته مترا واحدا وكان يتم استرجاع أفلام التصوير من خلال وضعها في كبسولة يتم إطلاقها باتجاه الأرض. وللحصول على دقة تمييز عالية يتم استخدام مرايا عاكسة بدلا من العدسات في كاميرات التصوير حيث يبلغ قطر المرآة عدة أمتار وذلك حسب الدقة المطلوبة. ولقد تمكنت الولايات المتحدة الأمريكية من خلال هذه البرنامج من تحديد كثير من مواقع منظومات الصواريخ العابرة للقارات والطائرات الحربية والغواصات وحاملات الطائرات وكذلك القنابل والمفاعلات الذرية في الاتحاد السوفيتي.



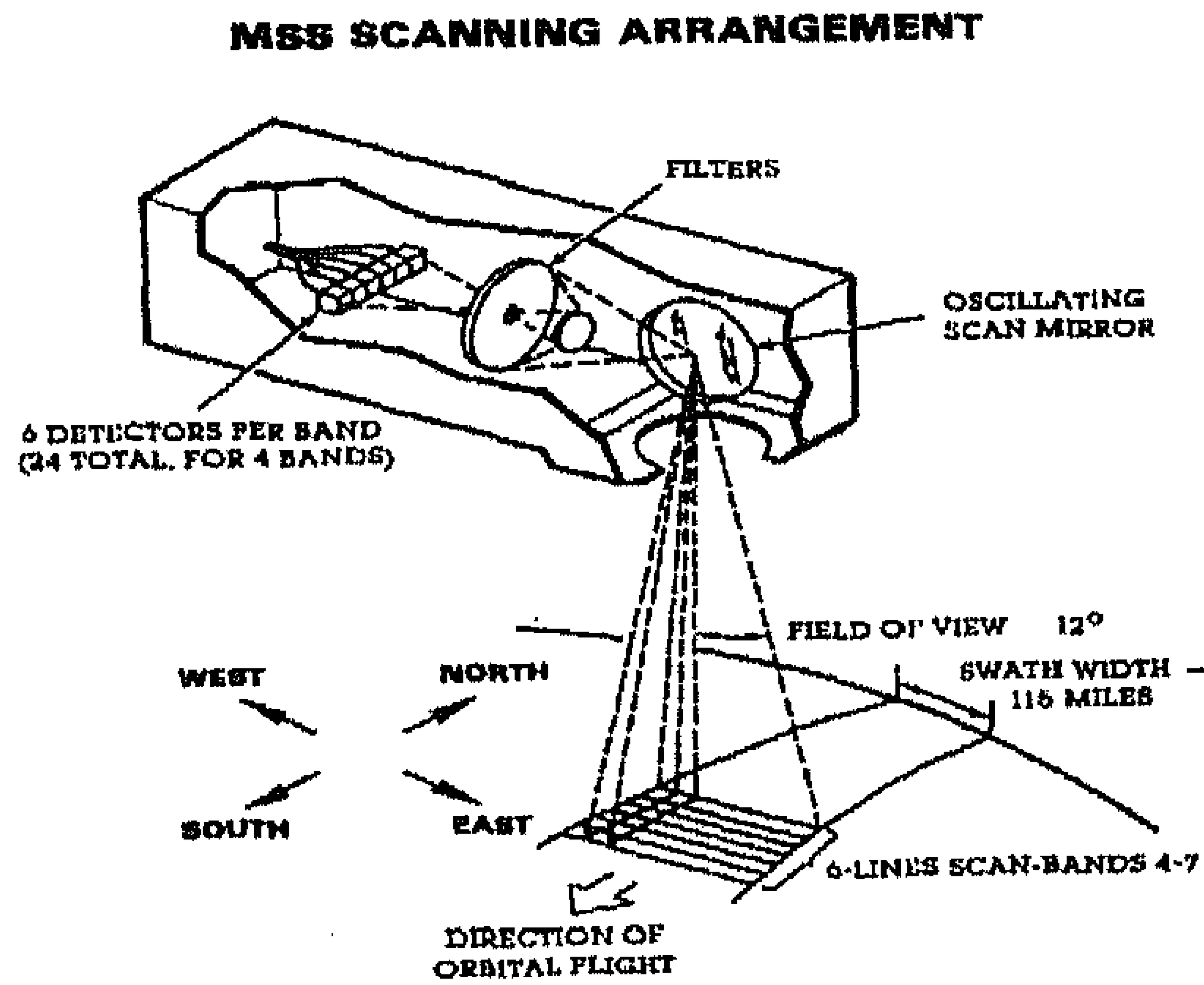
EARLY WARNING
The US Defense Support Program satellites detect incoming enemy missiles from geostationary orbit.

أما الإتحاد السوفيتي فقد بدأ برنامجه للتجسس والمسمى زينت (Zenit) في عام 1961 والذي استمر حتى عام 1994م وهو لا يختلف من حيث المبدأ عن البرنامج الأمريكي من حيث استخدام الكاميرات للتصوير ولكن استرجاع الأفلام يتم من خلال استرجاع كامل القمر والذي لا يتجاوز عمره الشهر الواحد. أما بريطانيا فقد بدأت برنامجها للتجسس في عام 1969م من خلال إطلاق أقمارها المسماة سكاينت (Skynet). وقد أطلقت إسرائيل أول أقمارها لأغراض التجسس في عام 1988م وهي الأقمار المسماة "أفق" وقد أطلق آخرها أفق-7 في عام 2007م. ومع تطور أنظمة الاتصالات طرأ تحول كبير في تقنيات أقمار التجسس حيث أصبح بالإمكان بث المعلومات التي تجمعها هذه الأقمار مباشرة إلى المحطات الأرضية باستخدام أنظمة الاتصالات المختلفة. وفي أقمار التجسس الحديثة يتم استخدام الكاميرات الرقمية مما سهل من عملية تخزين الصور الملتقطة في الذاكرات الرقمية ومن ثم إرسالها إلى المحطات الأرضية باستخدام أنظمة الاتصالات الرقمية. وفي الأنواع الحديثة من أقمار التجسس بلغت دقة التمييز في الصور الملتقطة أقل من عشرة سنتيمترات كما في قمر التجسس الأمريكي (KH-13) الذي يبلغ قطر مرآته ثلاثة أمتار وهو يزيد عن قطر مرآة التلسكوب الفضائي هابل (Hubble) الذي يبلغ قطر مرآته 2.4 متر.

الأقمار الصناعية للإستشعار عن بعد (Remote Sensing Satellite)

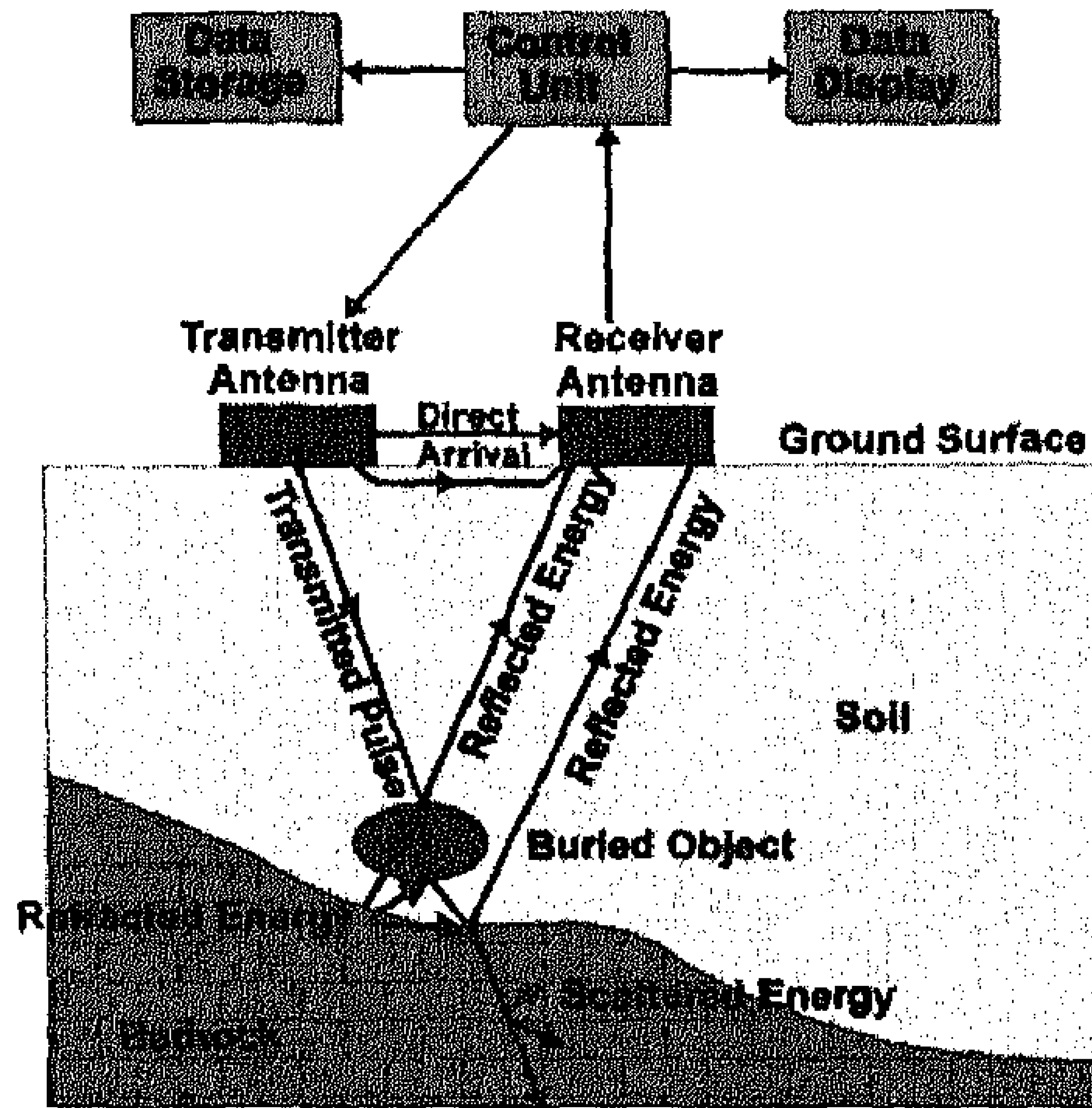
تستخدم تقنية الاستشعار عن بعد بشكل عام للتعرف على بعض خصائص الأجسام المختلفة دون لمسها وذلك من خلال معالجة الموجات الكهرومغناطيسية أو الصوتية المنبعثة منها أو المنعكسة عنها. ويتم ذلك باستخدام طريقتين وهما الطريقة السلبية والطريقة الفعالة ففي الطريقة الأولى يتم الاستفادة من الموجات الكهرومغناطيسية أو الصوتية التي تنبعث من الأجسام أو تنعكس عنها نتيجة لإضاءتها بمصدر طبيعي كالشمس مثلا. أما الطريقة الفعالة فيتم فيها معالجة الموجات المنعكسة عن الجسم بعد تسليط موجات كهرومغناطيسية أو صوتية يتم توليدها من قبل مصدر صناعي كالرادار أو السونار. وعندما قام العلماء باستخدام تقنية الاستشعار عن بعد في دراسة سطح الأرض تبين لهم إمكانية الحصول على معلومات بالغة الأهمية من الصور الملتقطة تعود بفوائد جمة على الجنس البشري. وقد تم في البداية استخدام الطائرات لحمل أجهزة الاستشعار عن بعد إلا أنه مع ظهور الأقمار الصناعية أصبحت هي الوسيلة الأفضل لقدرتها على تصوير أي منطقة على سطح الكرة الأرضية. وتقوم هذه الأقمار بأخذ الصور الفضائية العادية والرادارية وتحت الحمراء لرسم خرائط أكثر دقة للتضاريس الأرضية وكذلك لاكتشاف ثروات الأرض من معادن ومياه جوفية وبترول وغاز ولمتابعة زحف الصحراء وذوبان الثلوج وحرائق الغابات ورصد الزلازل والبراكين ولمكافحة الآفات الزراعية ولاكتشاف الآثار ولتخطيط المدن وإلى غير ذلك من التطبيقات التي لا حصر لها.

وقد بدأت الولايات المتحدة الأمريكية في عام 1972م بإنشاء أول برنامج للاستشعار عن بعد باستخدام الأقمار الصناعية بإطلاقها أو قمر لهذا الغرض وهو القمر المسمى لاندسات 1 (Landsat 1) تبعته بإطلاق سلسلة من هذه الأقمار كان آخرها الجيل السابع في عام 1999م . وقد تم وضع هذه الأقمار في مدارات قطبية منخفضة على ارتفاع 923 كيلومتر للأجيال الثلاثة الأولى و 705 كيلومتر للأجيال الأخيرة. وتكمل الأقمار الأخيرة دورتها حول الأرض في مائة دقيقة تقريبا وهي تقوم بمسح سطح الأرض على شكل أشرطة يبلغ عرض الشريط فيها 185 كيلومتر ولهذا فإنها تكمل مسح كامل سطح الأرض في 233 دورة حول الأرض أي في 16 يوما تأخذ خلالها 11 ألف صورة. إن المستشعر الرئيسي الذي تحمله أقمار لاندسات هو ما يسمى بالماسح متعدد الأطياف (Multi-Spectral Scanner) وهو عبارة عن نظام تصوير يقوم بالتقاط الموجات الضوئية المنعكسة عن سطح الأرض بحيث يغطي كل لاقط نطاق محدد من الطيف المرئي وتحت الأحمر وغالبا ما يوجد ثلاث لواقط تغطي الطيف المرئي وواحد أو أكثر لتغطية الطيف تحت الأحمر. ويتم إرسال الإشارات الكهربائية المتولدة من اللواقط إلى المحطات الأرضية من خلال أنظمة الاتصالات اللاسلكية التي تحملها



الأقمار لتقوم بمعالجتها تبعا للمعلومات المراد استخلاصها من هذه الصور. وإلى جانب أقمار لاندسات الأمريكية أطلقت دول أخرى أقمار للإستشعار عن بعد تحمل أجهزة متقدمة لتصوير سطح الأرض فقد أطلقت فرنسا أول جيل من قمرها المسمى سبوت (Spot) في عام 1986م والجيل الخامس في عام 2002م. ويعتبر المشروع الهندي للإستشعار عن بعد باستخدام الأقمار الصناعية من أنجح المشاريع حيث أطلقت 14 قمرا كأن أولها في عام 1988م.

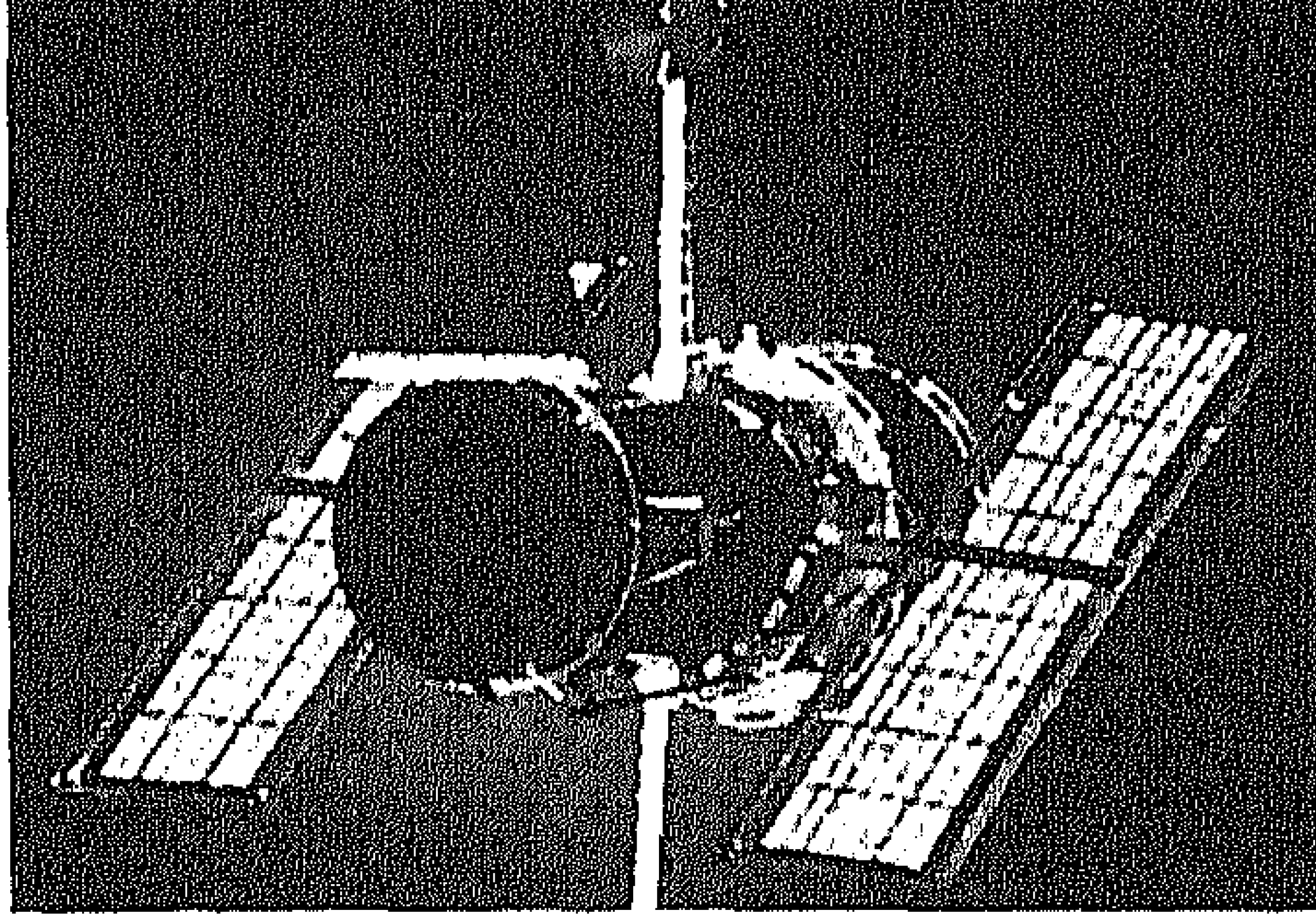
ومن الأقمار الصناعية التي تم استخدام الرادارات فيها لدراسة سطح الأرض القمر المسمى سيسات (SEASAT) والذي أطلق في عام 1978م من قبل وكالة الفضاء الأمريكية ناسا. ويعمل رادار الاستشعار عن بعد من خلال إرسال نبضات كهرومغناطيسية بترددات معينة ومن ثم التقاط النبضات المرتدة عن سطح الأرض والقيام بتحليلها باستخدام معالجات الإشارات الرقمية لرسم صور عن المنطقة الممسوحة. وتستخدم هذه الصور لاستخلاص معلومات مهمة عن طبيعة الأرض التي تم مسحها من قبل شعاع الرادار ومن هذه المعلومات طبيعة التضاريس الأرضية وطبوغرافيتها ونوع الغابات والنباتات والمحاصيل المزروعة والآفات الزراعية والظروف المناخية والبيئية والبراكين والزلازل والأعاصير والفياضانات والثروات المعدنية والمياه الجوفية والبترول . ويوجد أنواع مختلفة من رادارات الاستشعار عن بعد يتم تصميمها بناءا على نوع المعلومات المراد استشعارها وغالبا ما يعتمد هذا على مقدار التردد المستخدم في الرادار فالبحث عن ثروات الأرض يتطلب استخدام ترددات تقل عن واحد جيقاهيرتز وذلك لقدرتها على اختراق سطح الأرض بينما يتطلب رسم خارطة طبوغرافية ترددادت أعلى من ذلك بكثير للحصول قدرة تمييز عالية لتضاريس الأرض. ويستخدم الرادار الخارق للأرض في تطبيقات لا حصر لها في الجيولوجيا لمعرفة عمق وسمك الطبقات الصخرية وأنواع التربة والرواسب ووضع خرائط للتراكيب الجيولوجية وتحديد الكهوف والشقوق الطبيعية



والصدوع وكشف المياه الجوفية وآبار البترول والغاز. ويستخدم في التطبيقات البيئية لكشف التسريبات في خزانات المياه ووضع خرائط لمراقبة المواد الملوثة في المياه السطحية وكشف مواقع دفن النفايات وتحديد مواقع خزانات الوقود المدفونة وبراميل الزيت وتحديد مواقع التسربات النفطية. ويستخدم في مجال الهندسة المدنية لعمل الاختبارات الخرسانية وتحليل رصف الطرق وتحديد الفراغات وقوة الرصف وتحديد مواقع المرافق العامة المدفونة مثل أنابيب المياه والمجاري الحديدية والبلاستيكية والخرسانية وكذلك الكيبلات الكهربائية والهاتفية. ويستخدم في مجال الآثار لتحديد مواقع الأشياء المعدنية المدفونة كالكنوز ومواقع الكهوف السطحية والآبار والأجسام الأثرية. ويستخدم في التطبيقات العسكرية لكشف حقول الألغام بشكل عام والكشف عن مكان اللغم بالتحديد.

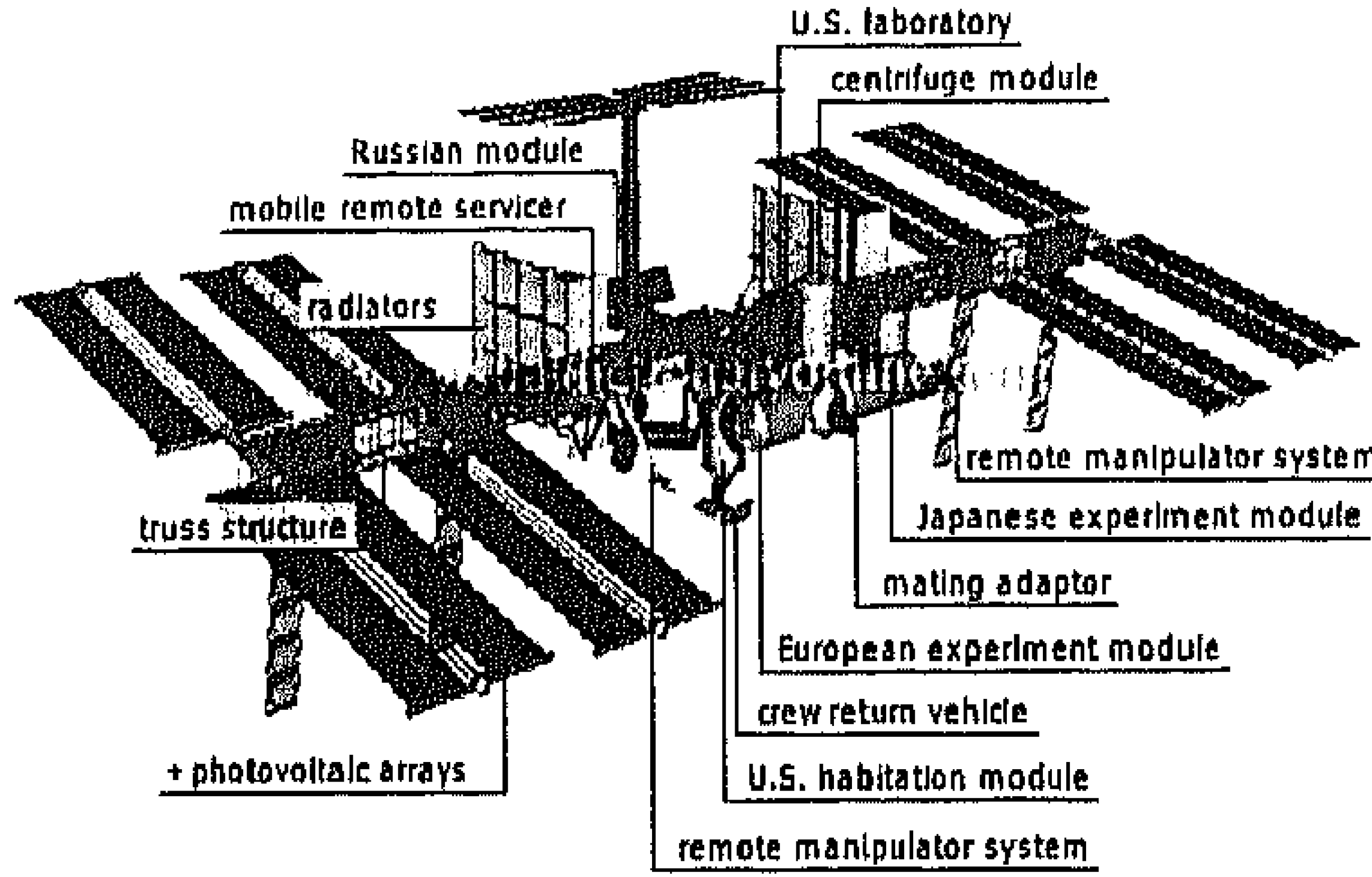
الأقمار الصناعية لأغراض الأبحاث العلمية (Scientific Research Satellite)

يستخدم العلماء بمختلف تخصصاتهم العلمية الأقمار الصناعية لدراسة مختلف أجرام هذا الكون وعلى وجه الخصوص الأرض التي يعيشون عليها. فمن من الفضاء الخارجي يمكن مشاهدة الأرض ودراسة تضاريسها وجوها بشكل أفضل وأشمل ويمكن كذلك دراسة أجرام الكون بشكل أدق حيث أن جو الأرض وطبقة الأينوسفير تمتص جزءا كبيرا من الموجات الكهرومغناطيسية والجسيمات الذرية القادمة من الفضاء الخارجي مما يترتب عليه فقد كبير في المعلومات التي تحملها هذه الموجات والجسيمات. ولقد قامت وكالة الفضاء الأمريكية في عام 1977م بإطلاق أول قمر لأغراض رصد مستويات أشعة جاما والأشعة السينية القادمة من الفضاء الخارجي. وفيما بعد قامت أمريكا وروسيا واليابان وبعض الدول الأوروبية بإطلاق ما يقرب من 600 قمر صناعي تحمل مختلف الأجهزة والمعدات التي يمكنها رصد المجرات والنجوم والشمس وكواكبها والمذنبات والنيازك وغيرها. وفي عام 1990م قامت وكالة الفضاء الأمريكية بالتعاون مع وكالة الفضاء الأوروبية بوضع تلسكوب الفضاء المشهور هابل (Hubble) في مدار دائري منخفض على ارتفاع 559كيلومتر وتم استخدامه لإلتقاط صور في غاية الوضوح للمجرات والنجوم. وفي نهاية الستينيات بدأ التفكير في إنشاء محطات فضائية في مدارات منخفضة حول الأرض وذلك لدراسة تأثير انعدام الجاذبية على الإنسان والحيوانات والنباتات وكذلك على التفاعلات الكيميائية والحيوية والصناعية.



وقد تمكن الروس في عام 1971م من بناء أول محطة فضائية وهي "ساليوت-1" على ارتفاع 200 كيلومتر من سطح الأرض وكان وزنها 18 طنا وسعتها الداخلية 100 متر مكعب. وبعد أربعة أيام من إطلاقها أرسل الروس المركبة الفضائية سويوز-10 وهي تحمل ثلاثة رواد وقد تمكنت من الالتحام بالمحطة لمدة خمس ساعات قام خلالها الرواد بإجراء بعض التجارب العلمية ثم عادت سويوز بركابها إلى الأرض. وفي الرحلة التالية إلى المحطة تمكن رواد سويوز-11 من المكوث 23 يوما داخل المحطة ومن المؤسف أن الرواد الثلاث قد توفوا في رحلة عودتهم إلى الأرض لأسباب لا زالت مجهولة. وقد تم إعادة ساليوت-1 إلى الأرض بعد أن مكثت في الفضاء ستة أشهر ومن ثم تم إطلاق سلسلة من المحطات الفضائية من نوع ساليوت وقد تمكن الرواد من العيش في ساليوت-7 لمدة ثمانية أشهر وكان ذلك في عام 1984م. وفي عام 1987م توقف برنامج ساليوت الروسي وبدأ بإطلاق جيل جديد من المحطات الفضائية الروسية من نوع مير وفي عام 1988م تمكن أحد الرواد من المكوث عاما كاملا على ظهر محطة مير. وفي عام 1973م قام الأمريكان ببناء أول محطة فضائية (مختبر فضائي) مأهولة وهي سكايلاب-2 (Skylab-2) على ارتفاع 435 كيلومتر عن سطح الأرض ويبلغ وزن هذه المحطة 88 طنا وحجمها 365 مترا مكعبا وهي على شكل أسطوانة يبلغ طولها 36 مترا وقطرها سبعة أمتار. وقد تمكن رواد أول رحلة لهذه المحطة من المكوث فيها مدة 28 يوما زادت إلى 56 يوما في الرحلة التالية ثم إلى 84 يوما في الثالثة. وقد بقي هذا المختبر في الفضاء لمدة تسعة أشهر وقد أجرى الرواد الذين تعاقبوا على هذا المختبر خلال هذه المدة كثير من التجارب العلمية والطبية

والفلكية بلغ عددها 270 تجربة. وفي عـــام 1998م بوشر العمل في بناء محطة الفضاء الدولية (International Space Station) بجهود مشتركة من أمريكا وروسيا واليابـــان والاتحاد الأوروبي وكندا وستكون أكبر جسم صناعي يدور حول الأرض عند الانتهاء من بنائها في عـــام 2011م. والمحطـــة تـــدور بسرعة 27743 ألف كيلومتر في الساعة في مدار دائري منخفض مائل عن خط الاستواء ب 51 درجة وعلى ارتفاع 350 كيلـــومتر عن سطح البحر ويبلـــغ طولهـــا 73 متـــر ووزنها 300 طن. وقد تمكن الـــرواد مـــن العيش فيها في عام 2000م ولم تخلو من رواد فضاء منذ ذلك الحين وقد كانت مؤهلة لاستيعاب ثلاثـــة رواد في البداية وهي قادرة على استيعاب ستة رواد في الوقت الحالي. ويوجد لكل دولة من الدول المشـــاركة فـــي هذا المشروع مختبراتها الخاصة بها حيث تجرى فيها مختلف أنواع التجارب العلميـــة فـــي مجـــال الفيزيـــاء والكيمياء والأحياء والفلك والزراعة والطب البشري والبيطري وغيرها من التخصصات وذلك في حالة انعدام الجاذبية.



الفصل الثاني عشر

أجهزة القياس الكهربائية

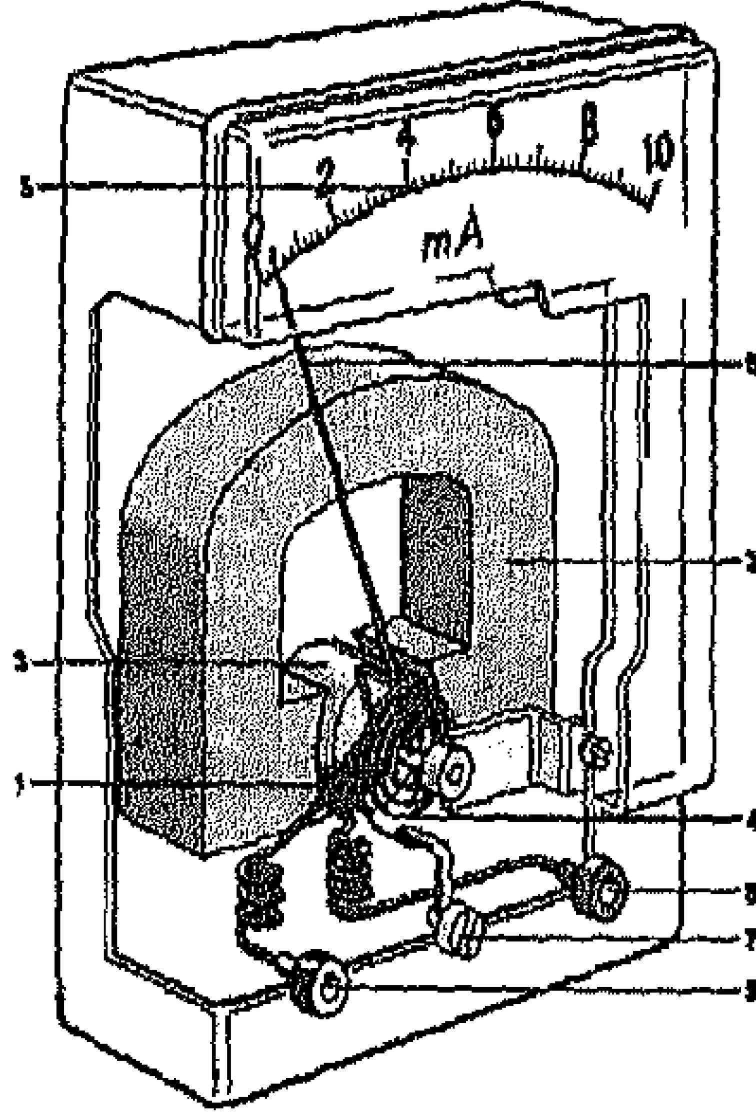
12-1 تمهيد

تلعب أجهزة القياس الكهربائية دورا بالغ الأهمية في مختلف القطاعات في عصر التكنولوجيا الحديثة فبدونها لا يمكن لكثير من القطاعات أن تكون على الوجه الأكمل التي هي عليه الآن. فلا يكاد يخلو اليوم قطاع من القطاعات من عشرات الأنواع من أجهز القياس الكهربائية فنجدها في البيوت والسيارات والطائرات والقطارات وفي المختبرات التعليمية ومراكز الأبحاث وفي العيادات والمستشفيات والمختبرات الطبية وفي المصانع بمختلف أنواعها ومحطات توليد الكهرباء ومصافي البترول وفي المناجم وغيرها الكثير. وتتميز أجهزة القياس الكهربائية على غيرها من أجهزة القياس بميزات لا حصر لها كصغر حجمها ودقة قياساتها وسهولة عرض قراءاتها بالطرق الرقمية وتكرار إجراء عملية القياس بمعدلات عالية وإمكانية أخذ القياسات في غياب العنصر البشري وإمكانية وضعها في الأماكن البعيدة والخطرة ونقل قراءاتها باستخدام أنظمة الاتصالات وإمكانية تخزين قراءاتها في ذاكرات الحواسيب واسترجاعها بسرعة عالية وكذلك إمكانية معالجة قراءاتها آنيا لاكتشاف أخطاء القياس المحتملة وإجراء الإحصاءات عليها. ومن أهم ميزاتها هو سهولة استخدامها في أنظمة التحكم في مختلف الأجهزة والمعدات فإشارات القياس الكهربائية سواءا كانت تماثلية أو رقمية يمكن تغذيتها مباشرة بعد إجراء بعض المعالجة لها إلى الحواسيب والمتحكمات والمحركات مما يساعد على ضبط عمل الأجهزة والمعدات المتحكم بها بشكل دقيق مما يقلل من تدخل العنصر البشري ويعمل على ضبط الجودة.

إن كل ما يلزم لقياس أي كمية فيزيائية هو تحويل هذه الكمية إلى إشارة كهربائية بحيث تتناسب قيمة جهد أو تيار الإشارة الكهربائية مع قيمة الكمية الفيزيائية المقاسة. ويطلق على الأجهزة التي تقوم بتحويل الطاقة الموجودة في الكمية الفيزيائية إلى طاقة كهربائية اسم المصوغات (transducers) أو الحساسات (sensors) والتي يوجد منها عشرات الأنواع تبعا لنوع الكمية الفيزيائية المقاسة كالميكانيكية والضوئية والحرارية والمغناطيسية والإشعاعية وغيرها. وفي المقابل يلزم في معظم التطبيقات وجود مصوغات تحول الإشارات الكهربائية بعد نقلها أو معالجتها أو تخزينها إلى مختلف أشكال الطاقة الأخرى وتسمى مثل هذه المصوغات بالمثيرات (actuator) كالسماعات والباعثات الضوئية والمرحلات والمحركات الخطوية وغيرها. ويلزم لعمل كثير من الأجهزة والمعدات الحديثة وجود ساعات (Clocks) ومؤقتات (Timers) تعمل على ضبط تسلسل العمليات المختلفة التي تقوم بها هذه الأجهزة والمعدات. وتتفاوت دقة الساعات والمؤقتات المستخدمة على نوع التطبيق فبعضها لا يلزمه إلا ساعات إلكترونية بسيطة بينما يلزم وجود ساعات ذرية لبعض التطبيقات كما في شبكات المعلومات وأنظمة الاتصالات وأنظمة تحديد الموقع.

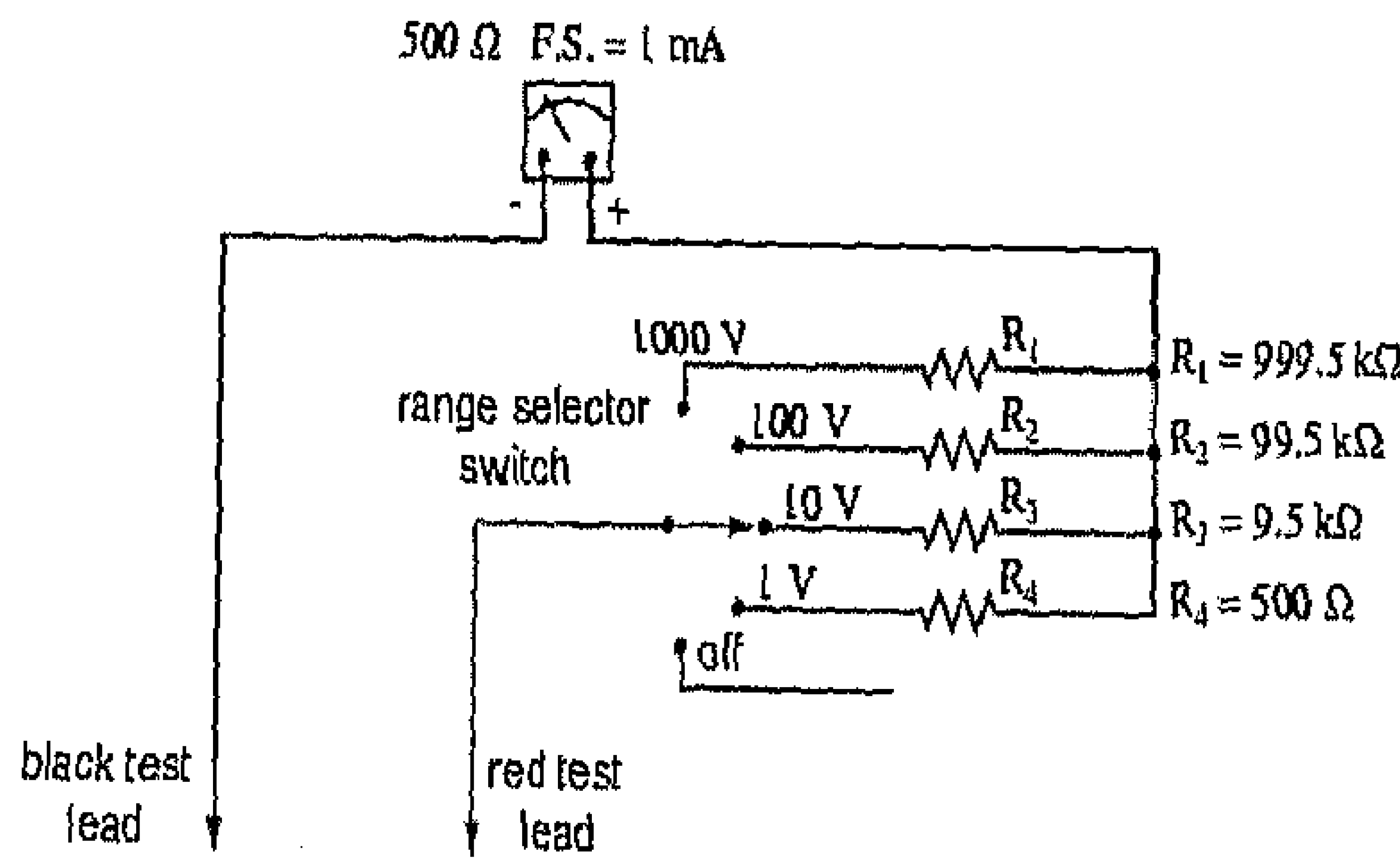
2-12 المقاييس الكهروميكانيكية التماثلية (Electromechanical Meters)

تستخدم المقاييس الكهروميكانيكية لقياس كل من فرق الجهد (Voltage) أو التيار (Current) أو القدرة (Power) أو الطاقة (Energy) للإشارة الكهربائية المراد قياسها. وتحتاج أجهزة مقياس الجهد (Voltmeter) ومقياس التيار (Ammeter or Ampere meter) ومقياس القدرة (Power Meter) في بنائها إلى جهاز يسمى الجلفانومتر (Galvanometer). ويتكون الجلفانومتر الدارج من مغناطيس دائم على شكل حذوة الفرس ومن ملف كهربائي متحرك مستطيل الشكل (Moving Coil) ملفوف على قلب حديدي أسطواني ويتم وضع القلب مع الملف في الفراغ فيما بين قطبي المغناطيس بحيث يتحرك الملف بحرية حول القلب على محور الارتكاز. ويتم ربط الملف بزمبرك أو نابض (Spring) وكذلك بمؤشر يتحرك على التدريج بحيث يكون سطح الملف في غياب التيار موازيا للخط الواصل بين القطبين. وعند مرور تيار كهربائي في الملف فإن المجال المغناطيسي الناتج عنه يعمل على تدوير الملف بحيث يكون سطح الملف متعامدا مع الخط الواصل بين القطبين ولكن الزنبرك يمنعه من الوصول إلى هذه الوضعية بل يتخذ وضعية فيما بين الوضعيتين ويعتمد مقدار انحراف الملف عن الوضع الابتدائي على شدة التيار المار به. ويتم تصنيع الجلفانوميتر بحيث يحدث الأنحراف الأقصى عند قيمة محددة للتيار تقاس إما بالميكرو أمبير أو بالمللي أمبير ويسمى الجلفانوميتر في هذا الحال إما ميكرو أميتر (microammeter) أو مللي أميتر (milliammeter). وقد تم اختراع هذا النوع من الجلفانومتر على يد الفرنسي (Jacques-Arsène d'Arsonval) وذلك في عام 1882م ولا زال يسمى باسمه وقد سبق أن اخترع اللورد كلفن نوع آخر يسمى الجلفانومتر ذي المرآة (mirror galvanometer) حيث يتم استخدام مرآة مثبتة على الملف لتعكس شعاعا من الضوء ليقوم مقام المؤشر.



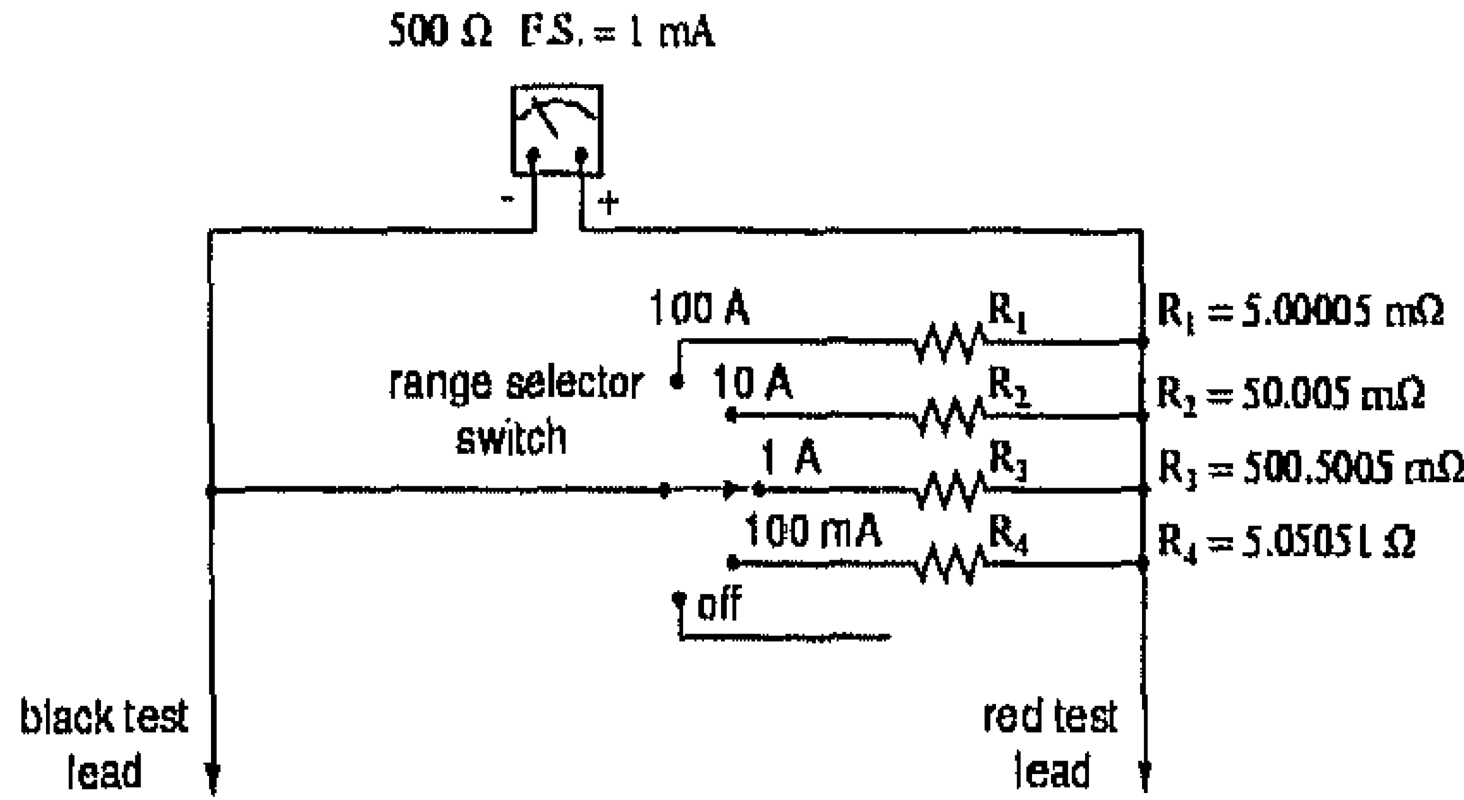
مقياس الجهد (Voltmeter)

يتم تحويل الجلفانومتر إلى مقياس الجهد (Voltmeter) من خلال إضافة مقاومة كبيرة على التوالي مع الجلفانومتر وتعتمد قيمة هذه المقاومة على أعلى جهد يراد قياسه. فعلى سبيل المثال إذا كان التيار المناظر لأكبر انحراف للجلفانومتر هو مللي أمبير واحد فإنه يلزم لقياس جهد يصل إلى 10 فولت مقاومة بقيمة 9.5 كيلوأوم على افتراض أن قيمة مقاومة ملف الجلفانومتر 500 أوم وذلك استنادا للمعادلة التالية حيث أن R_g هي مقاومة الملف و i_g هو هو القيمة القصوى للتيار ($R = V/i_g - R_g$). وغالبا ما يوجد عدة تدريجات



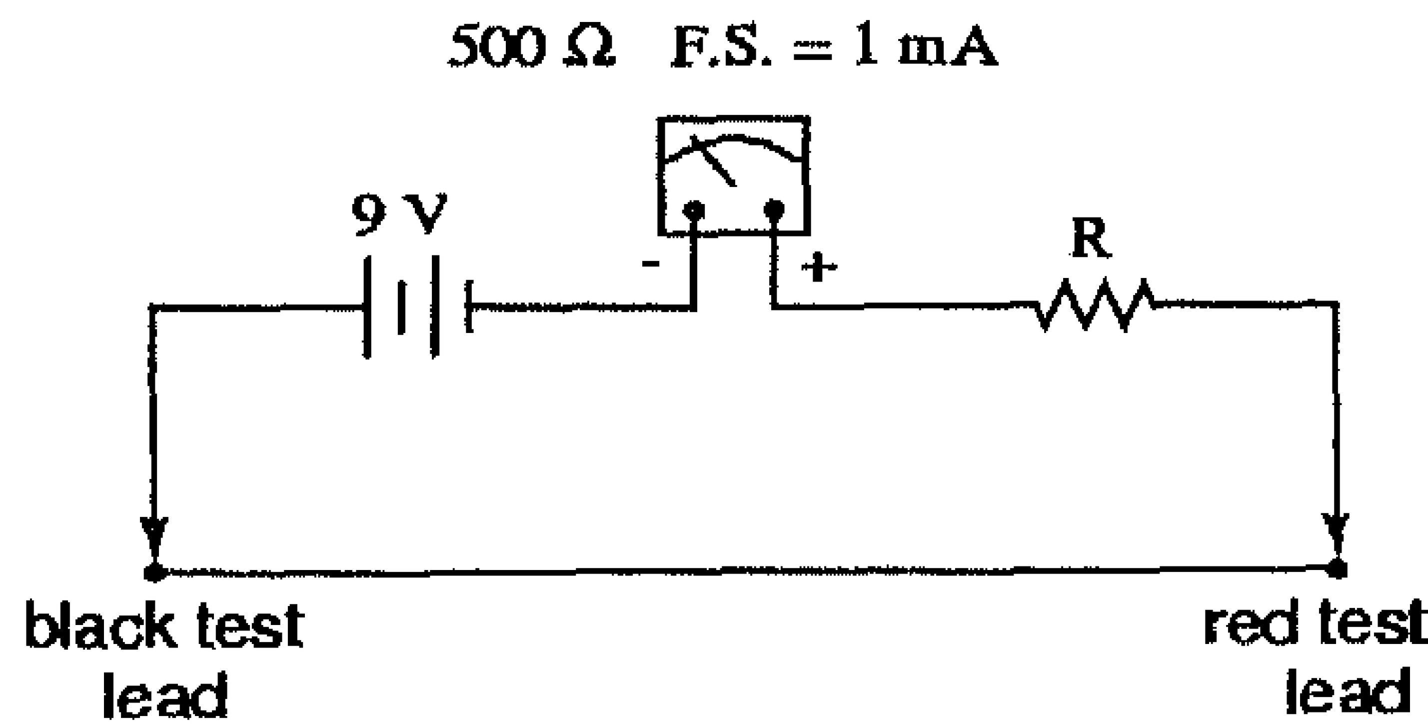
في مقياس الجهد الواحد وذلك باستخدام عدة مقاومات بدلا من مقاومة واحدة وذلك للحصول على قراءات دقيقة لفرق الجهد المراد قياسه وخاصة عند القيم الصغيرة. ويتم قياس فرق الجهد بين نقطتين على الدائرة الكهربائية من خلال ربط مقياس الجهد على التوازي (parallel) مع جزء الدائرة المراد قياس الجهد بين طرفيها وهذا يعني أنه لا يلزم فتح الدائرة الكهربائية عند قياس الجهد.

مقياس التيار (Ammeter)



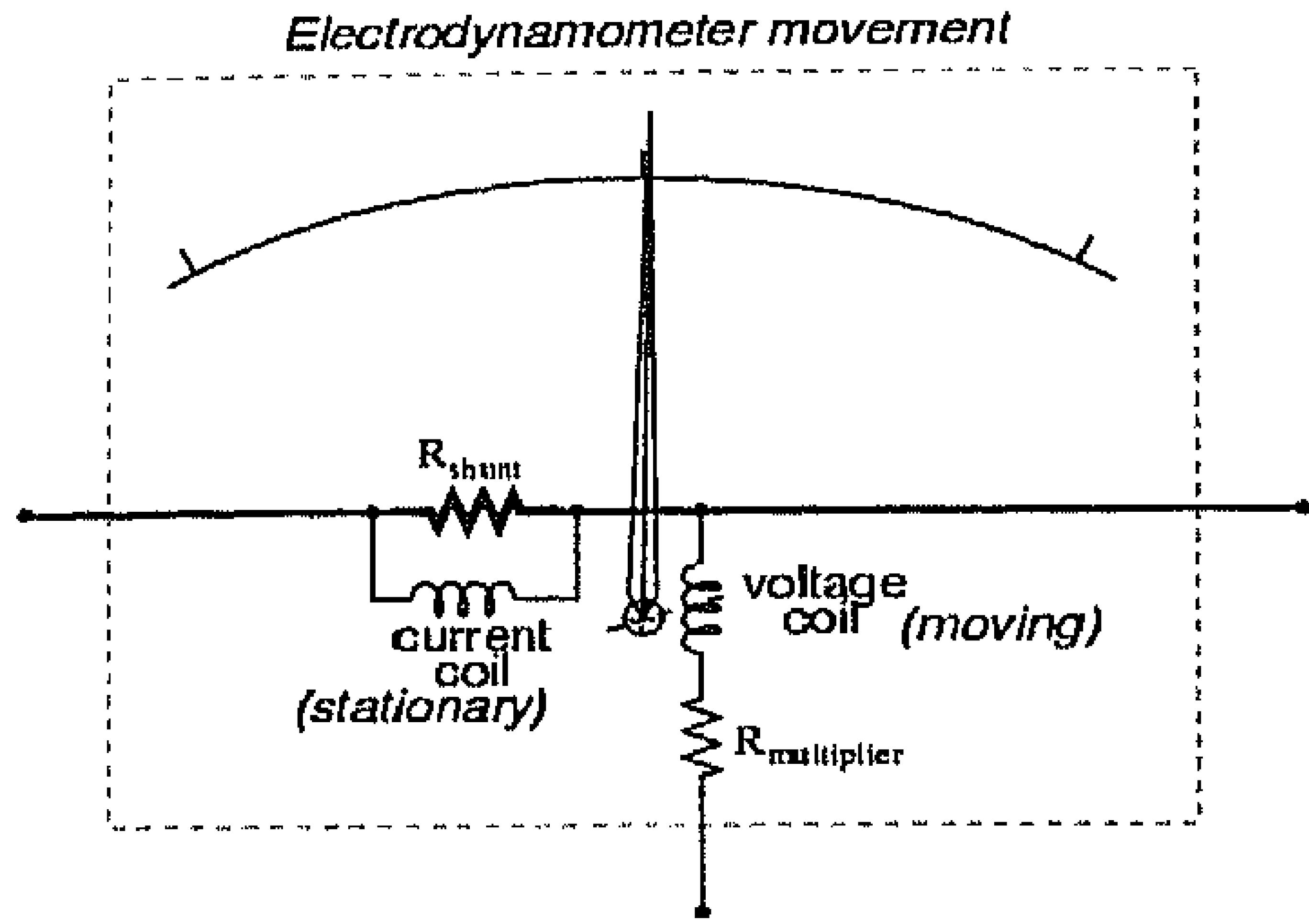
يتم تحويل الجلفانومتر إلى مقياس التيار (Ammeter) من خلال إضافة مقاومة صغيرة على التوازي مع الجلفانومتر وتعتمد قيمة هذه المقاومة على أعلى تيار يراد قياسه. فعلى سبيل المثال إذا كان التيار المناظر لأكبر انحراف للجلفانومتر هو مللي أمبير واحد فإنه يلزم لقياس تيار يصل إلى أمبير واحد مقاومة صغيرة جدا بقيمة 500 مللي أوم على افتراض أن قيمة مقاومة ملف الجلفانومتر تبلغ 500 أوم طبقا للمعادلة التالية ($S= R_g\ i_g/(i-i_g)$). وغالبا ما يوجد عدة تدريجات في مقياس التيار الواحد وذلك باستخدام عدة مقاومات بدلا من مقاومة واحدة وذلك للحصول على قراءات دقيقة للتيار المراد قياسه وخاصة عند القيم الصغيرة. ويتم قياس التيار المار في الدائرة الكهربائية من خلال ربط مقياس التيار على التوالي (series) مع جزء الدائرة المراد قياس التيار المار به وهذا يعني أنه يلزم فتح الدائرة الكهربائية عند قياس التيار.

مقياس المقاومة (Ohmmeter)

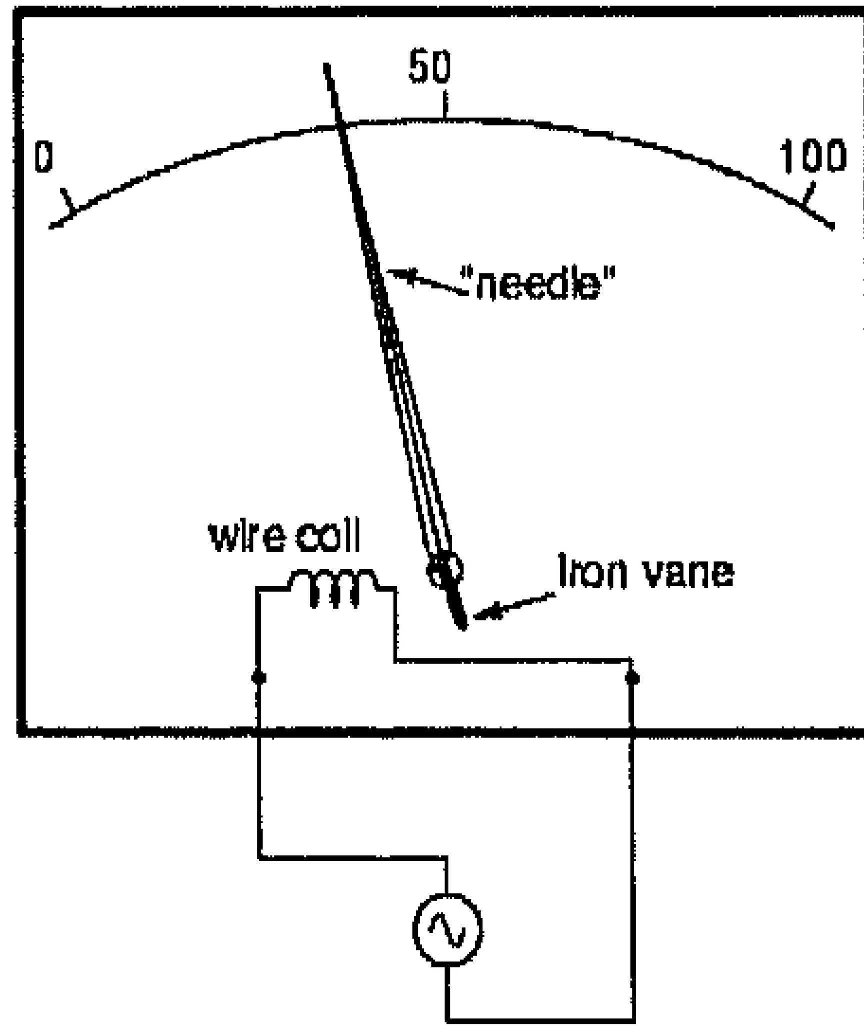


ويمكن استخدام الجلفانومتر كذلك كمقياس للمقاومة (Ohmmeter) ويتم ذلك من خلال ربط الجلفانومتر على التوالي مع بطارية ذات جهد معلوم ومقاومة محددة تعمل على منع التيار من تجاوز قيمته القصوى عند قياس المقاومات الصغيرة جدا. فعلى سبيل المثال إذا كان التيار المناظر لأكبر انحراف للجلفانومتر هو مللي أمبير واحد وكان جهد البطارية 9 فولت فإن قيمة المقاومة تبلغ 8.5 كيلوأوم على افتراض أن قيمة مقاومة ملف الجلفانومتر تبلغ 500 أوم ($R= 9/\ i_g\ -R_g$). وبما أن قيمة المقاومة المقاسة تتناسب عكسيا مع قيمة التيار فإن قيمة المقاومة تساوي صفرا عن الانحراف الأقصى للمؤشر وتساوي مالانهاية عند عدم وجود انحراف ولذلك يتم وضع قيم المقاومات على التدريج بشكل لوغارثمي (logarithmic). وفي الغالب يتم استخدام جلفانومتر واحد لقياس الجهد والتيار والمقاومة في جهاز قياس واحد يسمى الأفومتر (AVO meter) وذلك من خلال إعادة توصيل الجلفانومتر بمقاومات مختلفة إما على التوالي أو على التوازي كما شرحنا ذلك آنفا.

مقياس القدرة (Power Meter)

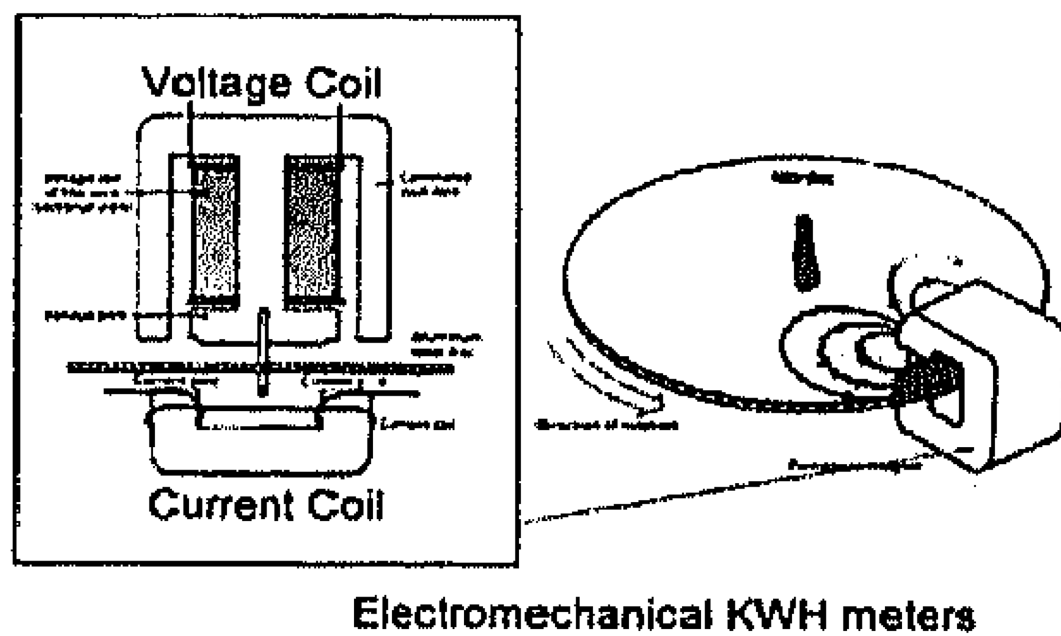


ويمكن استخدام الجلفانومتر بعد إجراء تعديل بسيط عليه لقياس القدرة (power) التي تذهب إلى أي جزء من الدائرة الكهربائية والتي هي حاصل ضرب قيمة التيار في قيمة الجهد. ويتم التعديل من خلال استبدال المغناطيس الدائم بمغناطيس كهربائي مكون من ملف ملفوف على قلب حديدي على شكل حذوة الفرس وفي هذا الحال يوجد ملفان في مقياس القدرة (power meter or Wattmeter) أحدهما متحرك كما هو الحال في الجلفانومتر العادي والآخر ثابت. ويتم وصل الملف المتحرك على التوازي مع الدائرة وذلك لتمرير تيار فيه يتناسب مع قيمة الجهد بينما يوصل الملف الثابت على التوالي مع الدائرة لتمرير تيار فيه يتناسب مع قيمة التيار. وعند تفاعل المجالان المغناطيسيان الناتجان عن هذين التيارين فإن المؤشر يتحرك بما يتناسب مع حاصل ضرب الجهد في التيار وهي القدرة التي تمتصها الدائرة.



إن المقاييس التي شرحناها آنفا والتي تستخدم الجلفانزمتر العادي تصلح لقياس التيار المباشر أو الثابت (Direct current) ولكنها لا تستخدم لقياس التيارات المتغيرة أو المتناوبة (Alternating current) بشكل مباشر بل يتطلب تحويل التيار المتناوب إلى تيار ثابت باستخدام ما يسمى بمقومات الموجة الكاملة (full-wave rectifiers). أما الطريقة الثانية وهي الأسهل فهي باستخدام جلفانومتر من نوع آخر وهو الجلفانومتر ذو الريشة الحديدية (Iron-vane electromechanical meter). وفي هذا الجلفانومتر يتم استبدال المغناطيس الدائم بمغناطيس كهربائي واستبدال الملف المتحرك بريشة حديدية مثبتة بذيل المؤشر وكذلك زنبرك الإرجاع (restoring spring). وعند تمرير التيار في ملف المغناطيس الدائم فإنه يجذب الريشة الحديدة بقوة تتناسب مع قيمة التيار إذا كان التيار من النوع الثابت أو بقوة تتناسب مع ما يسمى القيمة الفعالة أو القيمة المتوسطة لجذر مربع القيمة الآنية (root mean square (RMS)) إذا كان التيار من النوع المتناوب.

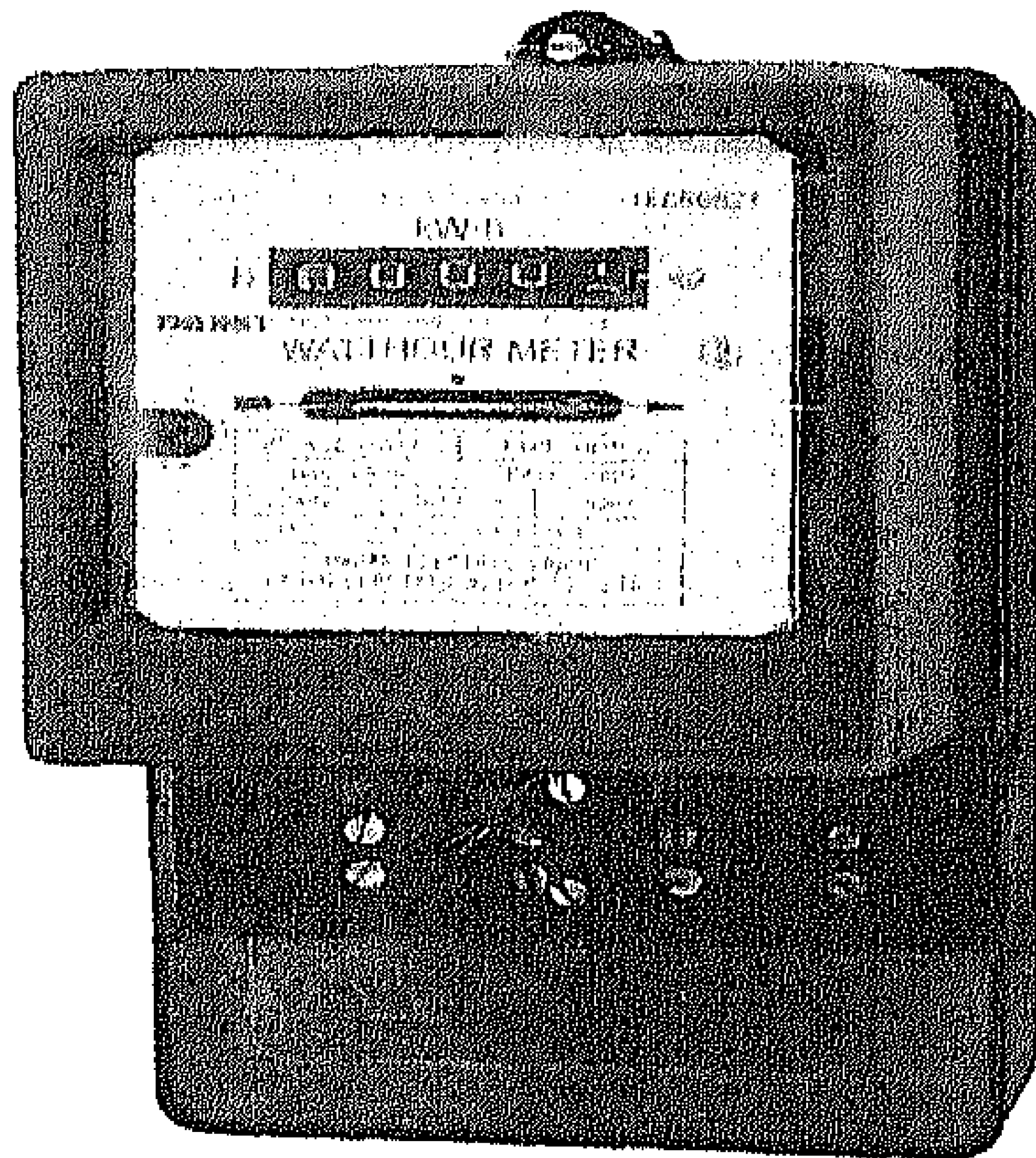
مقياس الطاقة الكهربائية (Electricity Energy Meter)



Electromechanical KWH meters

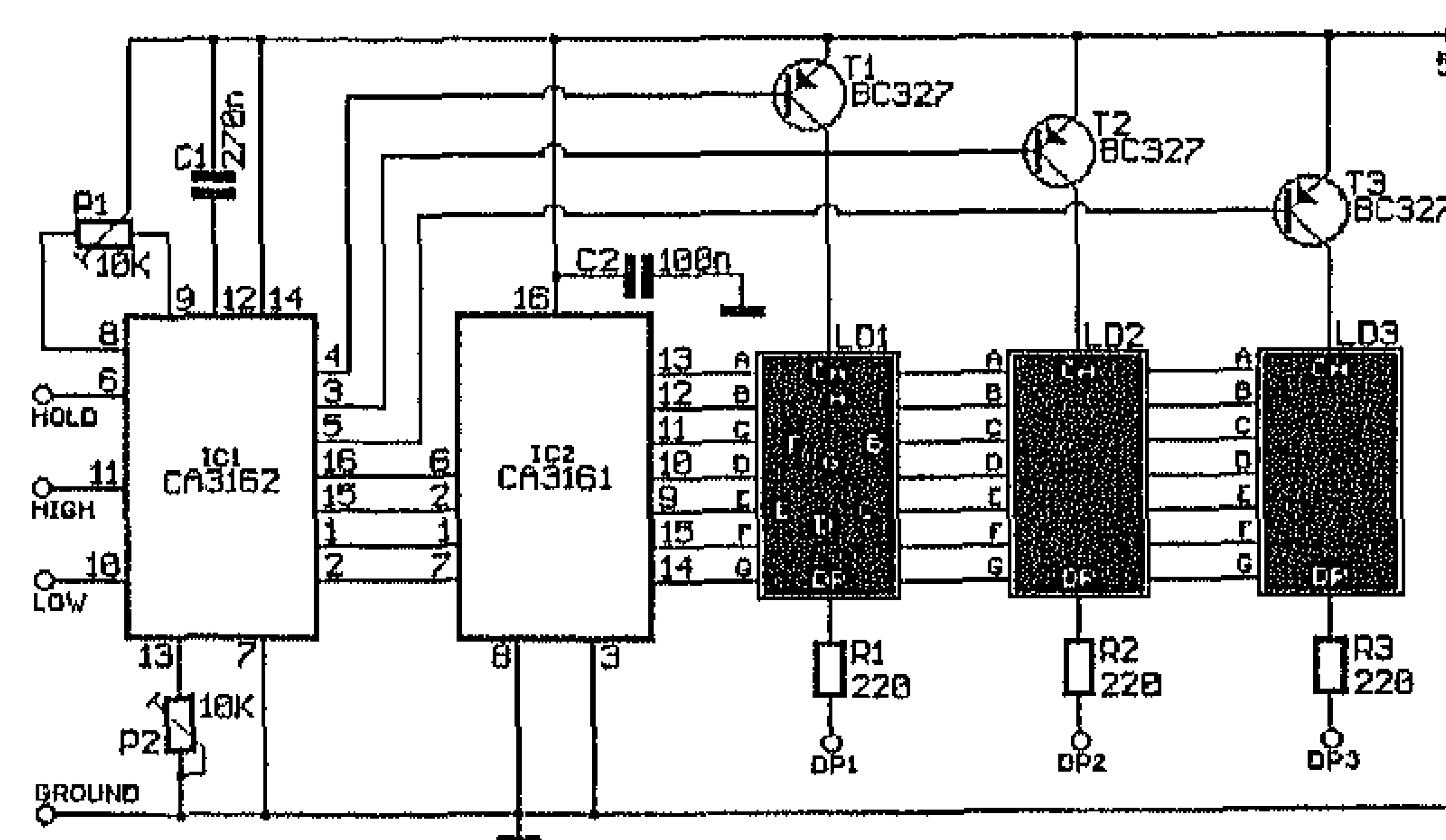
يستخدم مقياس الطاقة الكهربائية لقياس كمية الطاقة الكهربائية التي تستهلكها دائرة كهربائية ما خلال فترة زمنية محددة والطاقة هي حاصل ضرب القدرة (power) في طول الفترة الزمنية ووحدتها الأساسية الجول (Joule). إن أكبر مستخدمي مقاييس الطاقة هي شركات توزيع الطاقة الكهربائية حيث

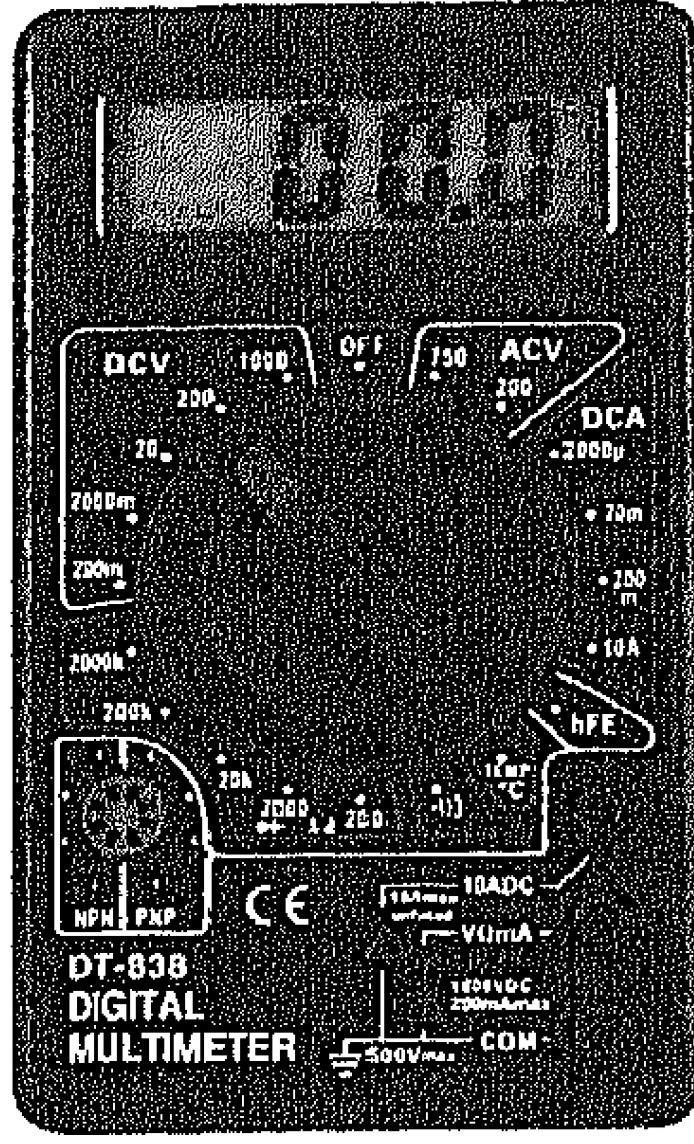
تستخدمها لقياس كمية الطاقة التي تستهلك في المنازل والمكاتب والمصانع وغيرها ولذلك فقد ظهر استخدامها مع أول ظهور لشركات توزيع الكهرباء في عام 1887م في الولايات المتحدة الأمريكية. لقد تم اختراع أشهر أنواع مقاييس الطاقة والذي لا زال مستخدما إلى الآن على يد المخترع الأمريكي (Elihu Thomson) في عام 1888م وهو النوع المسمى مقياس الواط-ساعة الحثي الكهروميكانيكي (electromechanical induction watt-hour meter). وكما هو واضح من اسم المقياس فإن الطاقة الكهربائية تقاس بوحدة الواط-ساعة أو فعليا بالكيلواط-ساعة وهي كمية الطاقة المستهلكة عندما تسحب الدائرة الكهربائية قدرة مقدارها كيلواط واحد لمدة ساعة أو ما يعادل 3600 كيلوجول. ويتكون مقياس القدرة من قرص معدني خفيف غالبا من الألمونيوم يدور تحت تأثير مجالين مغناطيسين يولدان من قبل ملفين كهربائيين أحدهما يحمل تيار يتناسب مع الجهد المسلط على الدائرة والآخر يحمل التيار المار في الدائرة كما هو الحال مع مقياس القدرة. ويتم كبح تسارع دوران القرص باستخدام مغناطيس دائم مما يجعل القرص يدور بسرعة ثابتة تتناسب طرديا مع مقدار القدرة. ويقوم القرص أثناء دورانه بتدوير مجموعة من التروس مرتبطة بعداد ميكانيكي يقوم بعد عدد دورات القرص والتي يتم معايرتها لتعطي القراءة بوحدة الكيلواط-ساعة. وفي الأنواع الحديثة تم استبدال العدادات الميكانيكية باستخدام العدادات الإلكترونية ويتم إظهار القراءة كأرقام على الشاشة. ومؤخرا ظهرت أنواع إلكترونية بالكامل من مقاييس الطاقة تم الاستغناء فيها الأجزاء الميكانيكية المتحركة كالقرص والتروس.



3-12 المقاييس الرقمية (Digital Meters)

لقد أدى التقدم الكبير في تقنية الإلكترونيات والتقنية الرقمية وتقنية الشاشات إلى تصميم مقاييس كهربائية لا يوجد فيها أجزاء ميكانيكية متحركة وتعطي قراءاتها بشكل رقمي على الشاشات بدلا من المؤشرات. ويعتمد عمل المقاييس الرقمية على دائرة إلكترونية مهمة تقوم بتحويل قيمة الجهد التماثلية المقاسة (analog voltage) إلى قيمة رقمية (digital number) تستخدم نظام العد الثنائي (binary system) وتسمى هذه الدائرة بالمحول التماثلي-الرقمي (analogue-to-digital converter). ويوجد أنواع لا حصر لها من هذه المحولات تستخدم في مختلف تطبيقات التقنية الرقمية إلا أن المقاييس الرقمية تستخدم أبسط وأبطأ هذه الأنواع وهو المسمى المحول ثنائي الميل (Dual-slope A/D converter) حيث لا يلزم سرعات تحويل عالية في مثل هذه المقاييس. وبما أن المحولات التماثلية

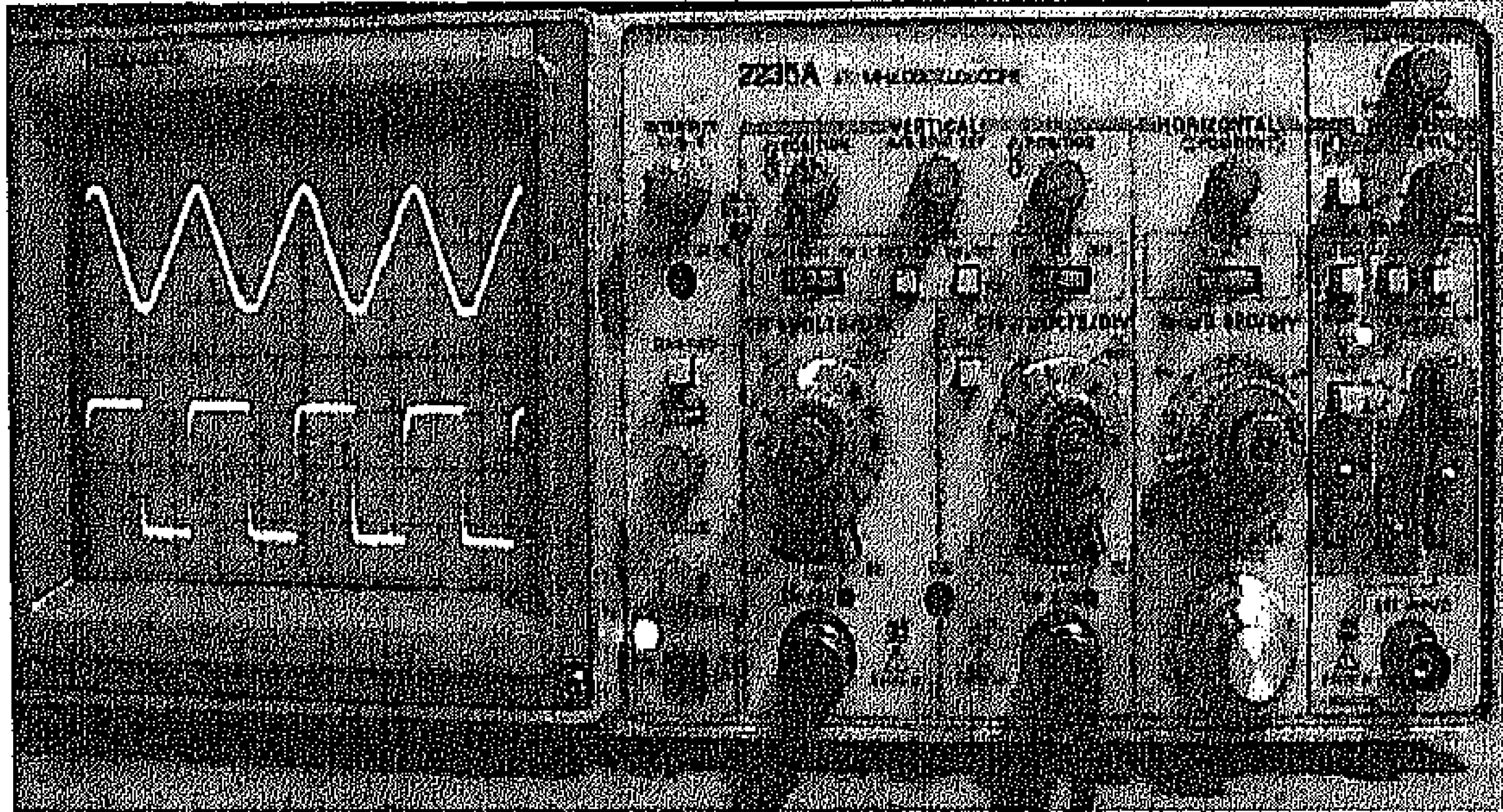




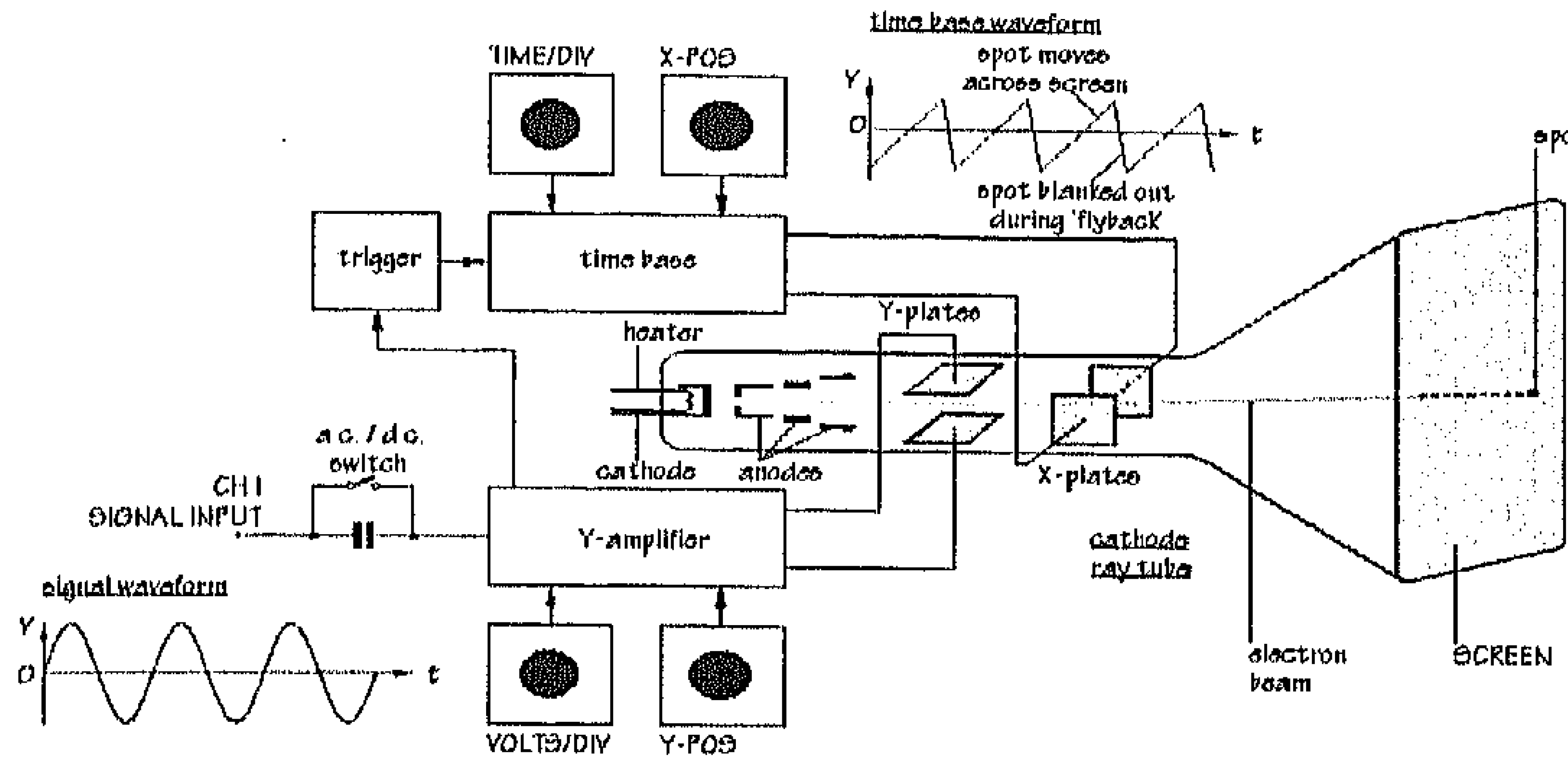
الرقمية تعمل على تحويل الجهد فقط فإنه يلزم عند قياس التيار تمريره في مقاومة معلومة صغيرة ومن ثم قياس فرق الجهد عليها باستخدام المقياس الرقمي. وغالبا ما يلزم تخفيض أو رفع الجهد المقاس إلى قيمة تقع ضمن المدى الذي يعمل عليه المحول التماثلي الرقمي وذلك باستخدام المقاومات أو المضخمات. وكذلك يلزم عند قياس الجهد والتيار المتناوب تحويله إلى جهد أو تيار ثابت باستخدام المقومات (rectifiers). وتستخدم الشاشات الرقمية لعرض الجهد أو التيار المقاس من خلال تحويل الأرقام الثنائية إلى أرقام عشرية بدوائر إلكترونية معروفة. وعادة ما يستخدم جهاز واحد كمقياس للجهد والتيار والمقاومة لكلي التيار الثابت والمتناوب ويطلق على هذا الجهاز اسم المقياس المتعدد الرقمي (digital multimeter) والذي غالبا ما يحتوي على وظائف أخرى كفحص الترانزستورات والثنائيات (diodes and transistors) واختبار التوصيلات فيما إذا ما كانت مغلقة أو مفتوحة (continuity test).

4-12 راسم الذبذبات (Oscilloscope)

يعتبر راسم الذبذبات أهم جهاز لقياس الكميات الكهربائية فهو يظهر قيمة الجهد أو التيار عند كل لحظة زمنية أي أنه يقوم بإظهار شكل الإشارة الكهربائية بكامل تفاصيلها على الشاشة وهذا على العكس من مقياس الجهد أوالتيار والذي لا يعطي إلا قيمة واحدة عن الإشارة. ويمكن استخلاص معلومات كثيرة من الإشارة المرسومة على شاشة راسم الذبذبات كشكلها وأعلى وأقل قيمة لها واللحظات الزمنية التي تكون قيمة الإشارة عندها صفرا وإذا كانت الإشارة من النوع الدوري (periodic) يمكن قياس ترددها (frequency) وطول الفترة الزمنية لدورتها (period). ويمكن استخدام راسم الذبذبات لعرض أكثر من إشارة على نفس الشاشة مما يساعد على مقارنة هذه الإشارات واستخلاص معلومات مفيدة عنها كالتأخير الزمني (time delay) وفرق الطور (phase difference) بينها. ويستخدم راسم الذبذبات في تطبيقات لا حصر في مختلف المجالات العلمية والصناعية. ففي الهندسة الكهربائية يستخدم الراسم للتأكد من أشكال الإشارات التي تولدها مختلف أنواع المولدات الكهربائية (electric generators) والمذبذبات (oscillators) والمهتزات (multivibrators) والمعدلات (modulators and demodulators). وفي الهندسة الطبية يستخدم الراسم لرسم الإشارات الكهربائية الصادرة من القلب والدماغ ومن خلال تفحص أشكالها يمكن استخلاص معلومات بالغة الأهمية عن وظائف هذه الأعضاء وتشخيص الأمراض فيها. وفي الهندسة الميكانيكية يمكن باستخدام الراسم تشخيص كثيرا من المشاكل التي تتعرض لها المحركات والتوربينات وبقية الأجهزة الميكانيكية وغير ذلك.

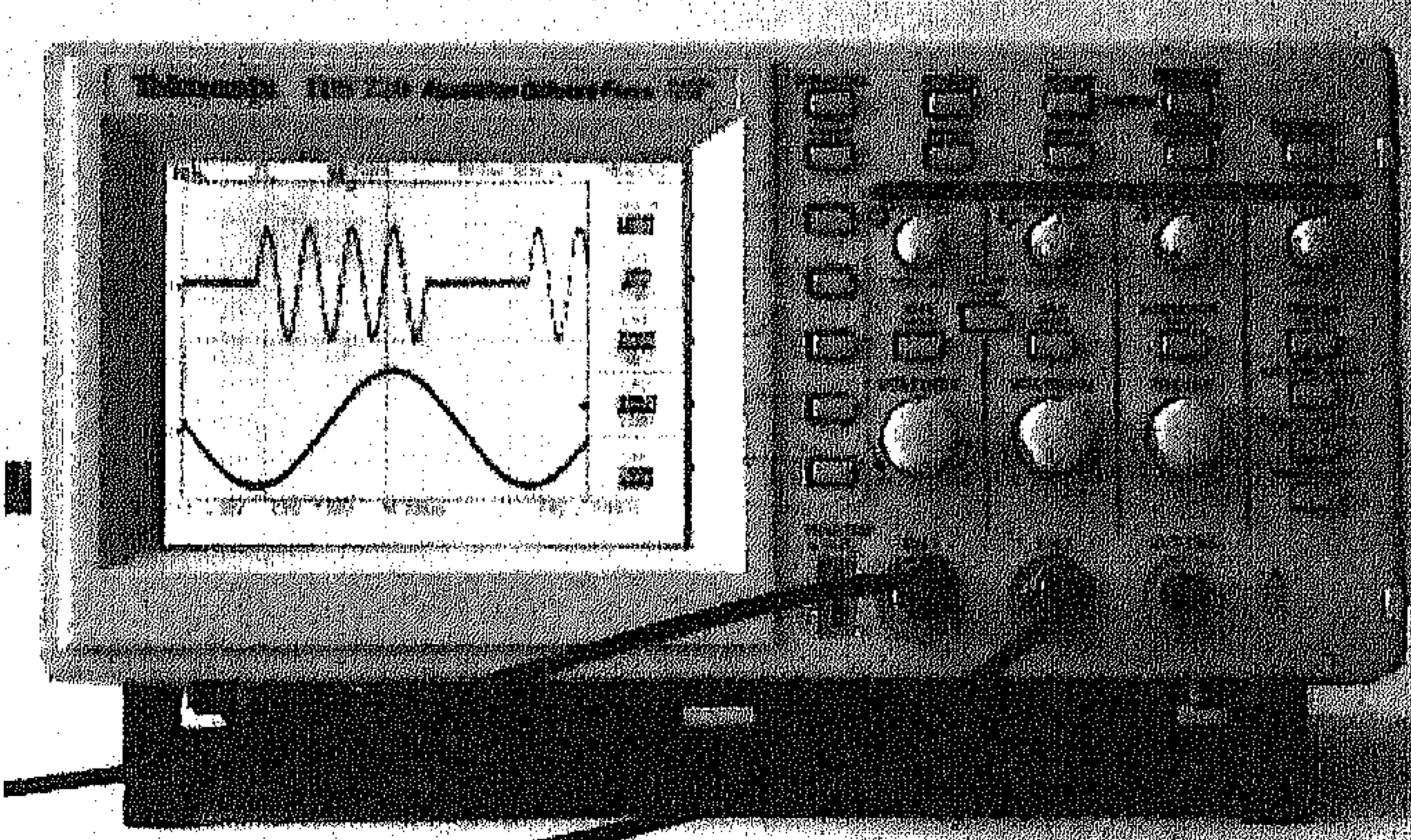


يعتبر أنبوب الأشعة المهبطية (cathode ray tube) والذي تم اختراعه في عام 1897م علـــى يــد الفيزيـــائي الألمـــاني (Karl Braun) قلب راسم الذبذبات. وهو أنبوب زجاجي مفرغ من الهواء ضيق عند إحدى طرفيه ومتســـع في الطـــرف الآخـــر ويوجـــد فـــي داخـــل طرفه الضيق قاذفـــة



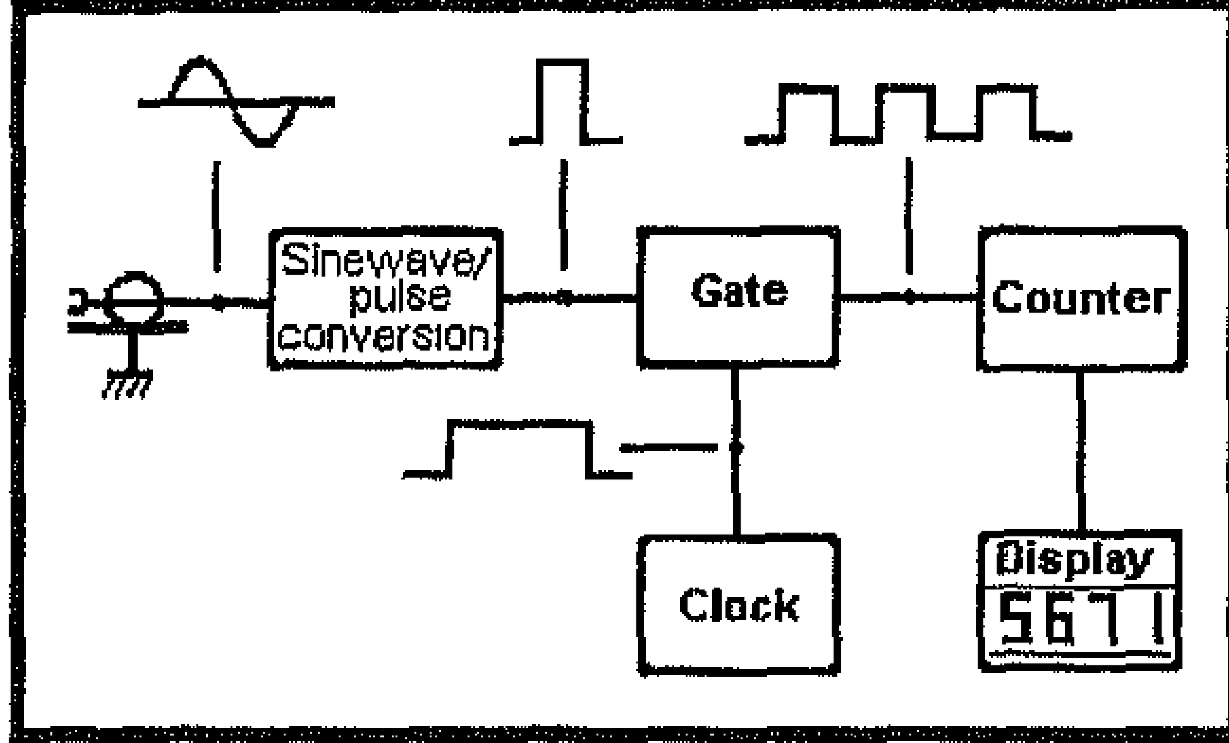
إلكترونية (electron gun) تولد شعاع إلكتروني دقيق جدا يتم توجيه إلى طرف الأنبوب المتسع وهو الشاشة والتي يتم طلاءها بطبقة فوسفورية تطلق ضوء أبيض عند اصطدام الإلكترونات بحبيباتهـــا. وتـــتم عمليـــة تحريك رأس الشعاع الإلكتروني في أنبوب الأشعة المهبطية على سطح الشاشة من خـــلال تســـليط مجـــالات مغناطيسية أو كهربائية عليه فينحرف عن مساره المستقيم تبعا لقـــانون لـــورنتز للقـــوة (Lorentz Force Law). ويوجد في أنبوب الأشعة المهبطية مجموعتان من الملفات أو الألواح التي تولد المجال المغناطيسي أو المجال الكهربائي وتوضعان عند نهاية الجزء الضيق من الأنبوب. فالمجموعة الأولى تعمـــل علـــى تحريـــك الشعاع أفقيا إما إلى اليمين أو إلى اليسار والمجموعة الثانية تعمل على تحريك الشعاع رأسيا إما إلى الأعلـــى أو إلى الأسفل وبمقدار يتناسب مع قوة هذه المجالات. وعلى العكس من الأنبوب المستخدم فـــي التلفزيـــون الذي يستخدم الملفات الكهربائية لتوليد المجال المغناطيسي كوسيلة للتحريك فإن أنبوب الراسم يستخدم الألواح (plates) لتوليد المجال الكهربائي كوسيلة للتحريك وهذا ضروري لرسم إشارات ذات ترددات عاليـــة جـــدا حيث أن الألواح تستجيب بسرعة أكبر للإشارات المسلطة عليها وذلك على عكس الملفات.

ولرسم الإشارات الكهربائية على الشاشة يـــتم تحريك الشعاع بسرعة ثابتة في الاتجـــاه الأفقـــي مـــن اليسار إلى اليمين وبشـــكل دوري وذلـــك مـــن خـــلال تسليط إشارة كهربائية لهـــا شـــكل كســـن المنشـــار (sawtooth) على الألواح الأفقية وهذه الحركة الأفقية



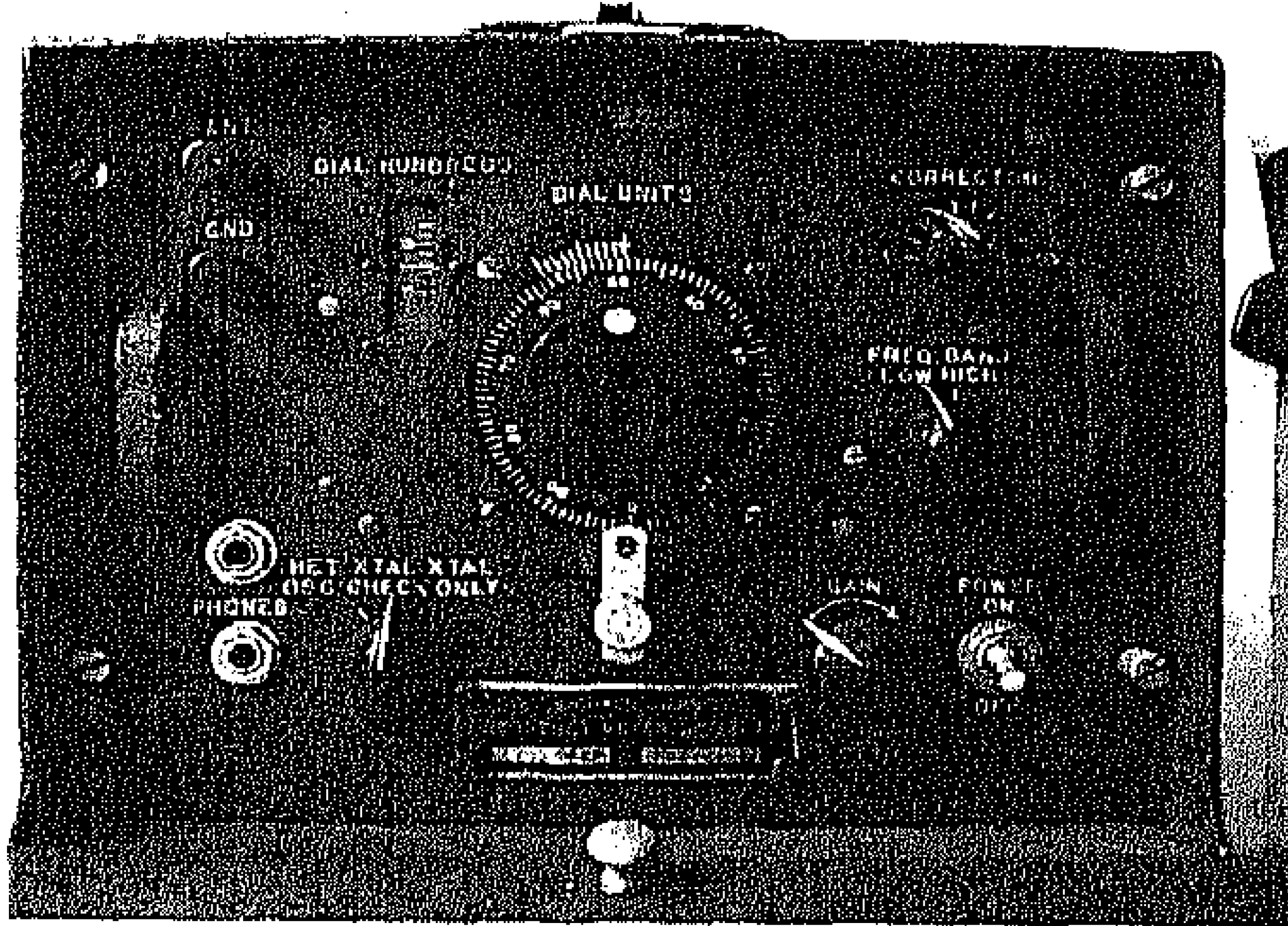
للشعاع تمثل محور الزمن (time axis). أما الإشارة المراد رسمها فيتم تسليطها بعد تكبيرها علـــى الألـــواح الرأسية فتعمل على تحريك الشعاع رأسيا وذلك حسب شدة الإشارة وبما أن الشعاع يتحرك بشكل متواصل في الاتجاه الأفقي فإن قيم الإشارة عند كل لحظة زمنية تظهر في مكان مختلف على الشاشة راسمة بـــذلك شـــكل الإشارة المسلطة. ويمكن التحكم بعدد دورات الإشارة التي تظهر على الشاشة من خلال التحكم بتردد إشـــارة

سن المنشار. ويمكن رسم إشارتان أو أكثر على الشاشة من خلال إضافة مجموعات ألواح رأسية أخرى مع ما يلزمها من مضخمات ولكن معظم راسمات الذبذبات ترسم إشارتين فقط على الشاشة. وتتفاوت راسمات الذبذبات المتوفرة في السوق تفاوتا كبيرا في إمكانياتها وخاصة التردد الأعلى للإشارة التي يمكن لها أن ترسمها. ومع ظهور التقنية الرقمية بدأت راسمات الذبذبات الرقمية بالظهور (digital oscilloscope) والتي تتميز على نظيراتها التماثلية (analog oscilloscope) بعدة ميزات أهمها إمكانية تخزين أشكال الإشارات المقاسة في ذاكرتها ولذلك يسمى راسم الذبذبات التخزيني الرقمي (Digital Storage Oscilloscope) وكذلك إمكانية رسم الإشارات اللادورية والتي تحدث لمرة واحدة حيث يمكنه إلتقاطها وتخزينها ومن ثم إظهارها على الشاشة ويمكنه كذلك إظهار بعض خصائص الإشارة كترددها وطول دورتها بشكل رقمي على الشاشة. ويمكن لبعض أنواع الراسمات الرقمية معالجة الإشارات إما في داخلها أو من خلال ربطها بالحواسيب وكذلك التحكم بها من خلال برامج مخزنة فيها أو عن بعد باستخدام الحاسوب.

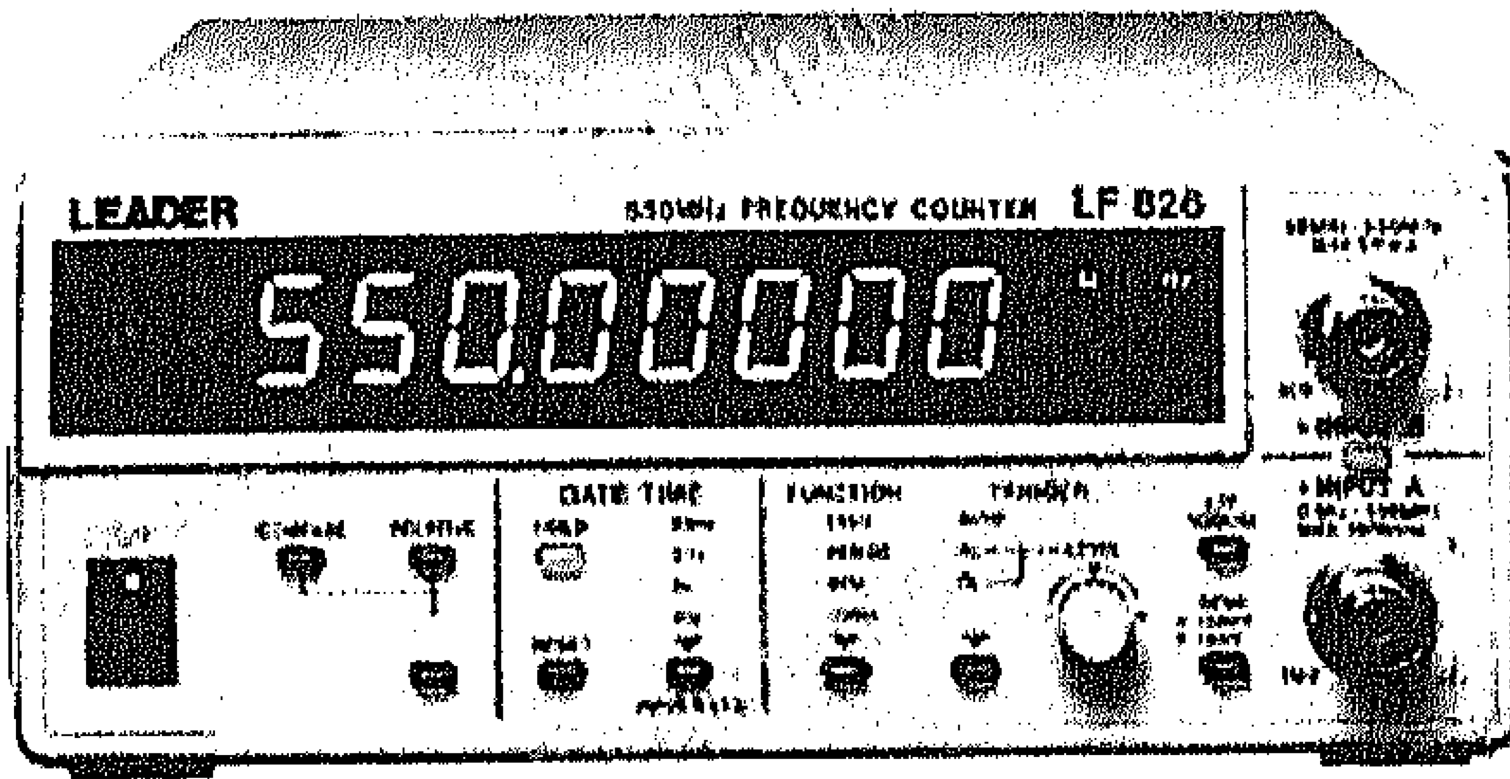


5-12 مقياس أو عداد التردد (Frequency meter or counter)

يستخدم مقياس التردد لقياس عدد الدورات (cycles) التي تحدث في الثانية الواحدة في الإشارات الدورية (periodic signals). ويستخدم مقياس التردد في مجالات كثيرة كقياس سرعة دوران المحركات الميكانيكية والكهربائية ومعدل دقات القلب. إلا أن أكثر استخدام له هو في أنظمة الاتصالات حيث يلزم تحديد الترددات الحاملة للمعلومات بشكل بالغ الدقة لمنع التداخل بينها خاصة في الأنظمة اللاسلكية كأنظمة البث الراديوي والتلفزيوني وأنظمة الاتصالات الخلوية والأقمار الصناعية والأمواج الدقيقة. ولقد عانى مهندسو الاتصالات معاناة بالغة في أول ظهور أنظمة البث الراديوي في العشرينات من القرن العشرين بسبب غياب أجهزة لقياس ترددات البث وكانوا يستخدمون طرق معقدة وغير دقيقة لتحديد قيمة التردد. وكان أحدث ما استخدموه قبل ظهور عدادت التردد الحديثة في نهاية الستينات العداد المسمى (Heterodyne Frequency Meter) والذي يستخدم دوائر توليف معقدة (tuning circuits) بوجود مذبذب مرجعي عالي الدقة. ومع تقدم تقنية الالكترونيات والتقنية الرقمية بدأت مقاييس التردد الحديثة بالظهور والتي لا يحتاج بناؤها إلا إلى قطع إلكترونية بسيطة مع شاشة الإظهار الرقمية التي بدأ تصنيعها في بداية السبعينات. ويتكون مقياس التردد الرقمي الحديث من عداد ثنائي العد (binary counter) ومن مذبذب عالي الدقة (oscillator) كالمذبذبات البلورية (crystal oscillators) ومن شاشة عرض رقمية كشاشات البلورات السائلة (liquid crystal display (LCD)) وبعض البوابات المنطقية (logic gates).



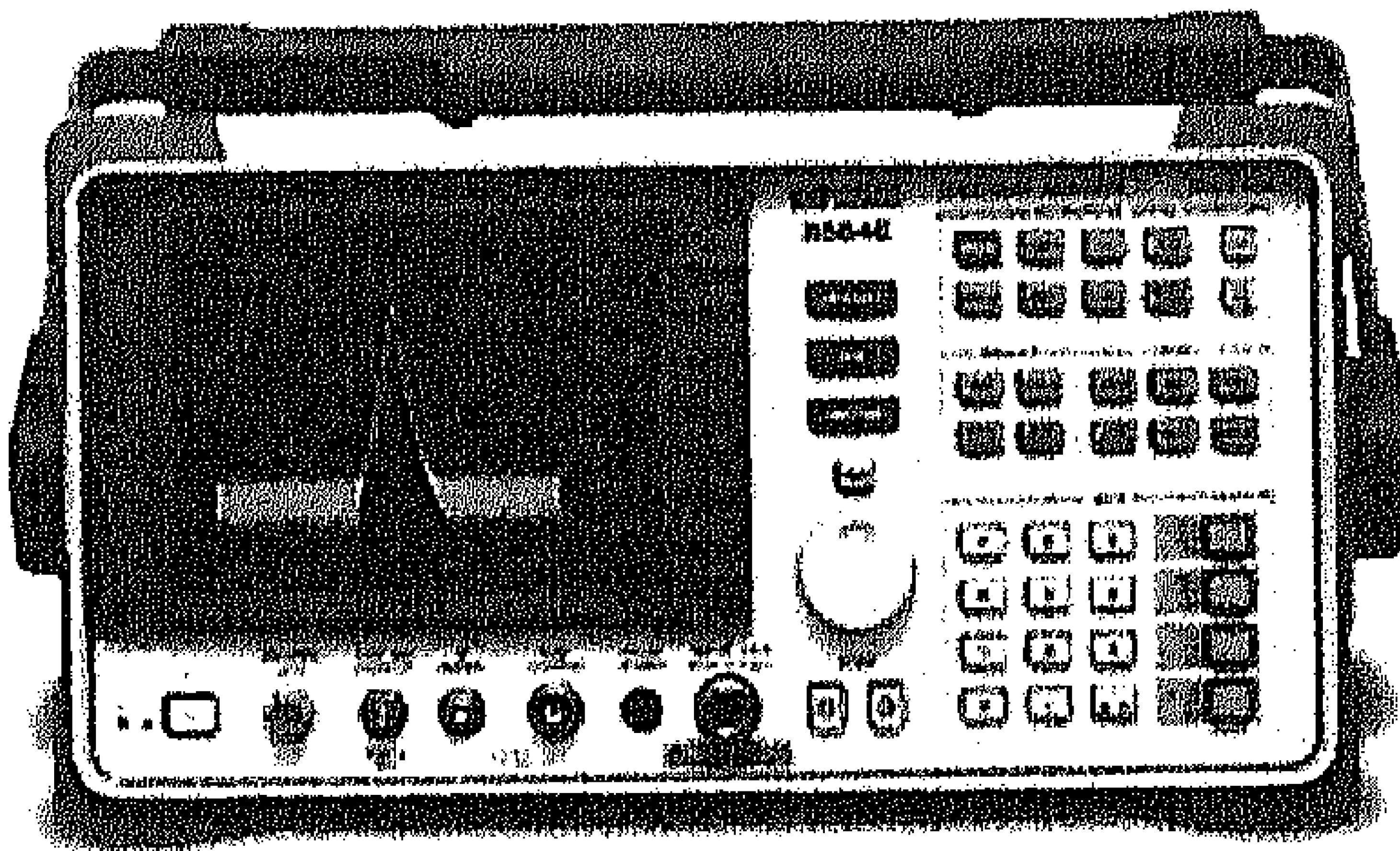
ويلزم لقياس تردد الإشارات الجيبية (sinusoidal signals) وغيرها من الإشارات غير النبضية تحويلها إلى إشارات نبضية (pulsed signals) باستخدام بعض الدوائر الإلكترونية كالمقارنات (comparators) والمهتزات إحادية الاستقرار (monostable multivibrators) بحيث تولد نبضة واحدة لكل دورة من دورات الإشارة المقاسة. وتتم عملية قياس التردد من خلال فتح بوابة منطقية (logic gate) لفترة زمنية محددة يتم تحديدها من قبل الساعة (clock) ويمر عبر البوابة خلال هذه الفترة عدد معين من النبضات المتعلقة بالإشارة المقاسة يتم عدها من قبل العداد الثائي ومن ثم يتم تحويل الرقم الثنائي المقاس إلى أرقام عشرية يتم إظهارها على الشاشة. إن أهم مواصفات مقياس التردد هو أولا أعلى تردد يمكن له أن يقيسه وثانيا أقل قيمة لجهد الإشارة المقاسة أو ما يسمى بالحساسية (sensitivity) وثالثا دقة القياس. فدقة القياس تتحدد من دقة الساعة والتي تتحدد بدورها من المذبذب المرجعي (reference oscillator). أما الحساسية فتتحدد من إمكانيات المضخمات (amplifiers) الموجودة في مدخل مقياس التردد. وأما أعلى تردد يمكن أن يقاس بمقياس التردد فيعتمد بشكل رئيسي على سرعة العد القصوى للعداد والتي تتحدد تبعا للعائلة المنطقية المستخدمة (logic family: TTL, ECL, CMOS…) في بناء مكونات العداد. وبما أن سرعة عد معظم العدادات لا تتجاوز المائة ميجاهيرتز فإنه يلزم لقياس الترددات العالية وخاصة التي تقع في منطقة الأمواج الدقيقة (microwave) استخدام طرق لتنزيل هذه الترددات لتقع ضمن سرعة عد العداد أو ما يسمى بمحول الخفض (down converter) والذي يتكون من مازج (mixer) ومذبذب محلي (local oscillator) عالي التردد. وإلى جانب قياس التردد يمكن لمعظم مقاييس التردد قياس عرض النبضة مقاسة بالثانية وذلك في الإشارات النبضية. ويوجد في الأسواق الآن مقاييس للتردد يمكنها قياس ترددات من 0.1 هيرتز إلى مائة جيقاهيرتز وهي بذلك تغطي كامل الطيف الراديوي الذي تعمل فيه معظم أنظمة الاتصالات.



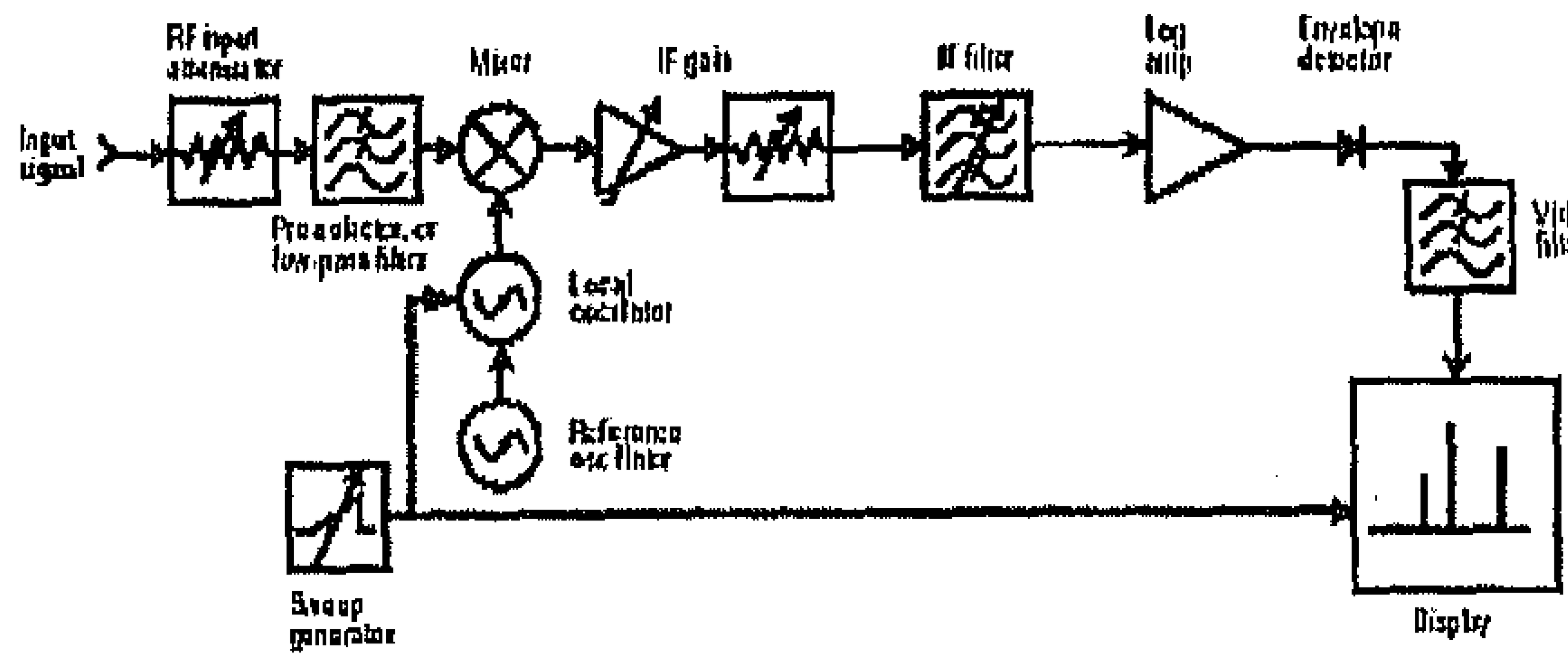
6-12 المحللات (Analyzers)

محلل الطيف (Spectrum Analyzer)

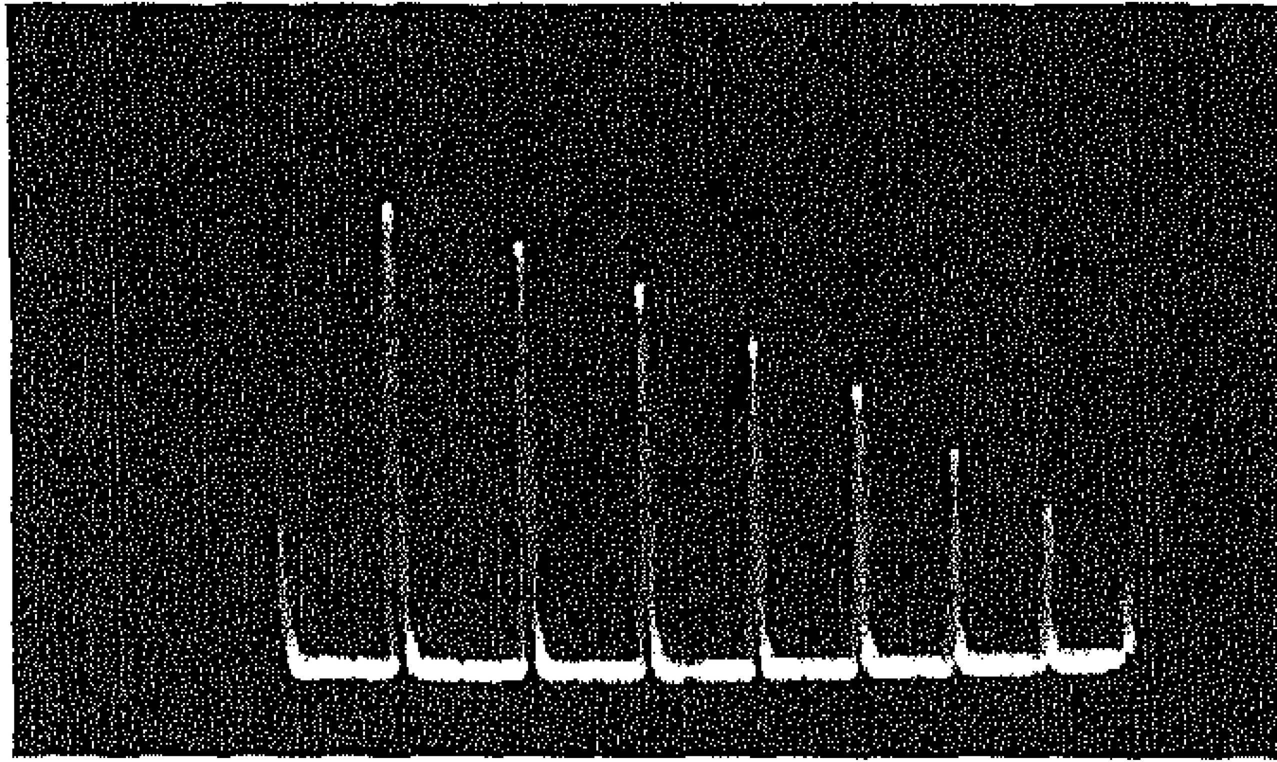
باستثناء الإشارات الجيبية (sinusoidal signals) والتي تتكون من تردد واحد فإن معظم الإشارات الكهربائية التي يتعامل معها المهندسون بمختلف تخصصاتهم تتكون من طيف من الترددات (frequency spectrum). وغالبا ما يساعد معرفة هذا الطيف المهندسين في استخلاص معلومات بالغة الأهمية لا يمكن لهم استخلاصها من النظر إلى شكل الإشارة على راسم الذبذبات. ففي أنظمة



الاتصالات الكهربائية يمكن للمهندسين تحديد عـرض نطـاق الإشـارات المحملـة بالمعلومـات (signal bandwidth) وبالتالي تحديد عدد الإشارات التي يمكن إرسالها عبر قنـاة الاتصـال (communication channel). وفي الهندسة الميكانيكية يمكن استخلاص معلومات مهمة عن حالة المحرك من طيف التـرددات أكثر مما يستخلصوها من شكل الإشارة الأصلية. ومن الناحية النظرية يمكن إيجاد طيف الترددات لأي إشارة باستخدام الرياضيات من خلال ما يسمى بتحويل فورييه (Fourier Transform) حيث يتم تحويل الإشـارة كدالة تعتمد على الزمن إلى دالة تعتمد على التردد. أما عمليا فيتم رسم الطيـف باسـتخدام محلـل الطيـف المزجـي (superheterodyne spectrum analyzer) والـذي يتكون من مازج (mixer) ومـن مذبذب محكوم بالجهد محلي (local voltage-controlled oscillator) ومن مولـد إشـارات على شكل سن المنشار يسمى مولد المسح (sweep generator) ومن مجموعة من المرشحات وكذلك أنبوب أشعة مهبطية لرسم الطيف على الشاشة. وتتم عملية إيجاد الترددات التي تحتويها إشارة ما من خلال ضـرب الإشارة المعنية بالإشارة الجيبية التي يولدها المذبذب المحلي باستخدام المازج وتمرير الناتج من خلال مرشـح تمرير نطاقي ضيق (narrow bandpass filter) بتردد وسطي معلوم. فإذا كانت الإشارة تحتـوي التـردد المطلوب فستظهر إشارة على مخرج المرشح وإلا تكون صفرا ومن خلال تغيير تـردد المذبـذب المحلـي باستخدام مولد المسح يمكن إيجاد جميع الترددات التي تحتويها الإشارة.



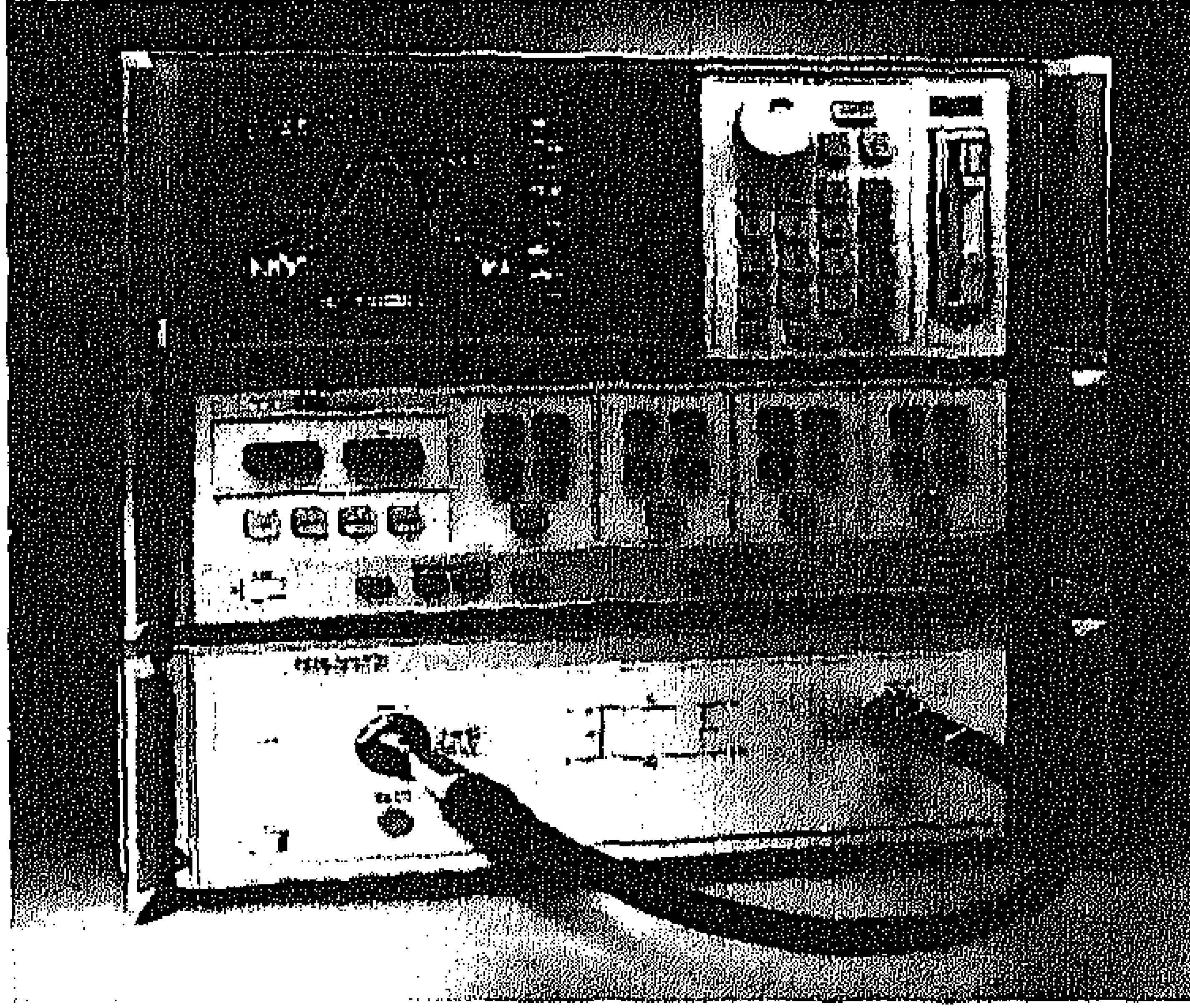
ويتم إظهار طيف الترددات على شاشة أنبوب الأشعة المهبطية من خلال تحريك الشـعاع الإلكترونـي أفقيـا بالجهد الذي يولده مولد المسح والذي يمثل تردد المذبذب المحلي بينما يسلط خرج المازج بعد تمريـره علـى المرشح على القناة الرأسية للأنبوب لتحريك الشعاع في الاتجاه الرأسي إذا كان التردد موجودا في الإشـارة. وفي راسم الطيف المثالي تظهر الترددات الموجودة في الإشارة على شكل خطوط رأسية دقيقة لهـا ارتفـاع يتناسـب مـع اتسـاع الإشـارة (signal amplitude) عند التردد المقـاس. أمـا مـن الناحية الفعلية فإن الخطوط التي تظهـر علـى الشاشة لها عرض معين يعتمد علـى عـرض نطاق المرشح والذي كلما قل كلما قل عـرض الخطوط. إن أحد أهم مواصفات محلل الطيـف هو مدى نطاق الترددات التي يمكن له أن يحللها حيث يوجد في الأسواق أنواع باهضة الثمن تغطي كامل الطيف الراديوي. أما المواصفة الثانية فهـي قدرتـه على التمييز بين الترددات المتجاورة وهذا يعتمد بشكل رئيسي على عرض الخط والذي يتحدد كما ذكرنا على عرض نطاق المرشح والذي كلما قل كلما زاد تعقيده وكلفته. ومع ظهور محللات الطيف الرقمية تم التغلـب على كثير من المشاكل الموجودة في الأنواع التماثلية حيث أصبح بالإمكان إيجاد طيف الإشارة حسـابيا مـن خلال المعالجات الدقيقة الموجودة في المحلل أو من خلال ربطها بالحاسوب. وتتم عملية إيجاد الطيـف مـن خلال أخذ عينات من الإشارة وتحويلها إلى إشارات رقمية يتم معالجتها رقميا باسـتخدام تحـويلات فورييـه

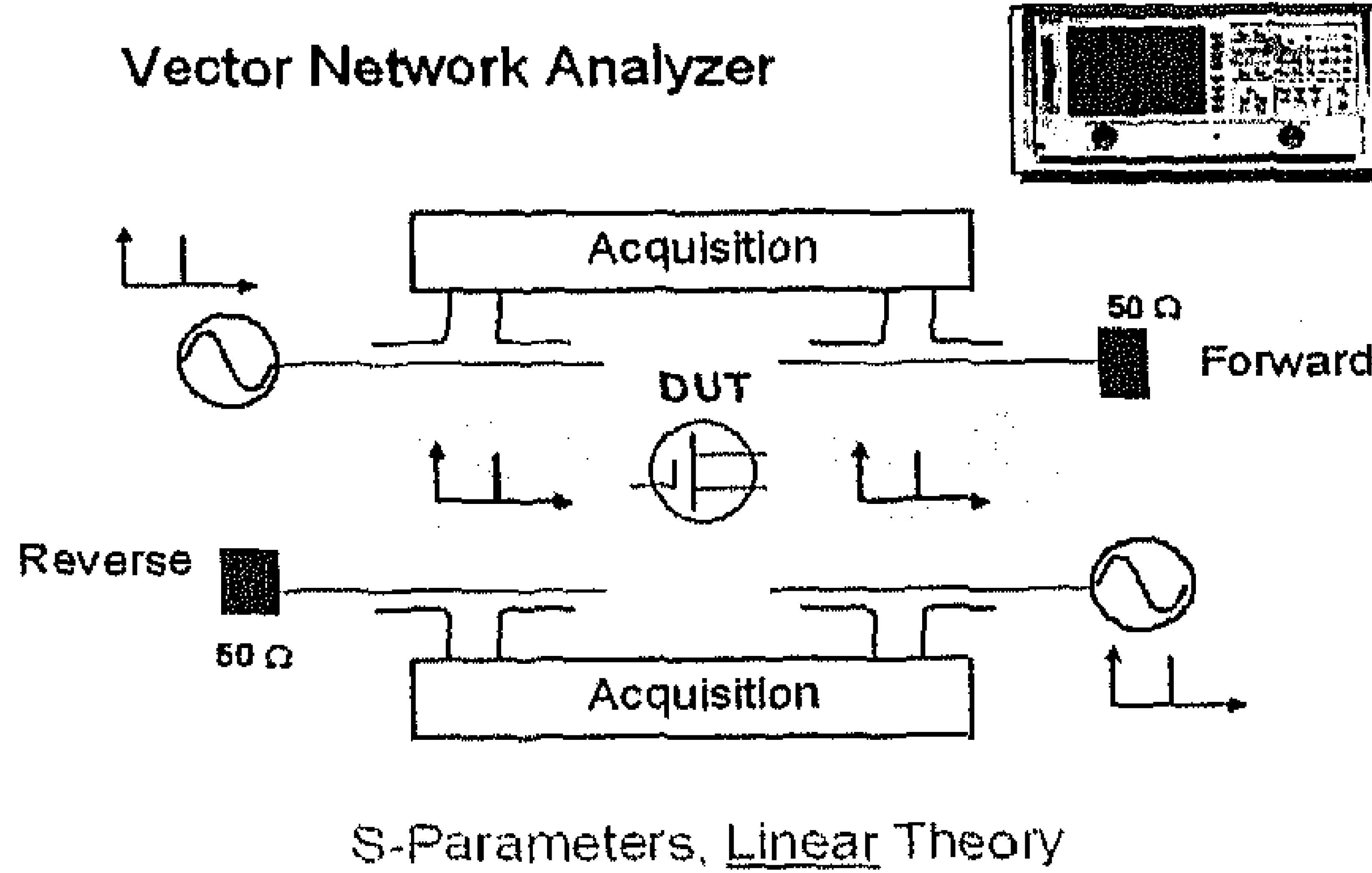


الرقمية ومن ثم إظهار الطيف على الشاشة.

محلل الشبكة (Network Analyzer)

يستخدم محلل الشبكة لإيجاد خصائص كثير من الأجهزة والدوائر الإلكترونية وخاصة التي تعمل عند الترددات العالية وبالتحديد نطاق الأمواج الدقيقة (microwave). ومن أهم الخصائص التي يمكن لمحلل الشبكة أن يوجدها هو علاقة الإشارة عند مخرج الجهاز مع الإشارة عند مدخله عند الترددات المختلفة وهو ما يسمى بالدالة الانتقالية (transfer function). ويستخدم محلل الشبكة لقياس معاوقة الدخل (input impedance) للجهاز قيد الفحص وكذلك مقدار الكسب (gain) أو الفقد (loss) ومعامل الانعكاس (reflection coefficient) ومعامل الإرسال (transmission coefficient) ونسبة الموجة الثابتة (standing wave ratio) وما يسمى (S-parameters). ويوجد نوعان من محللات الشبكة أحدهما يوجد العلاقة بين الخرج والدخل بدلالة اتساع الإشارة (amplitude) ويسمى هذا النوع محلل الشبكة الكمي (scalar network analyzer) أما النوع الثاني فيوجد العلاقة بين الخرج والدخل بدلالة اتساع وطور الإشارة (amplitude & phase) ويسمى هذا النوع محلل الشبكة المتجهي (vector network analyzer). يتكون محلل الشبكة من مولد ذبذبات جيبي(sinusoidal function generator) يغطي نطاق الترددات التي تمكنه من فحص الدوائر المعنية ومن مستقبل (receiver) واحد على الأقل يمكنه استقبال نطاق الترددات التي يولدها المولد الجيبي ومن شاشة العرض. ويتم ربط الجهاز قيد الاختبار (Device Under Test (DUT)) بحيث يربط مخرج المولد الجيبي مع مدخل الجهاز ومدخل المستقبل مع مخرج الجهاز. ويقوم محلل الشبكة بإيجاد مواصفات الجهاز المختلفة عند تردد واحد أو طيف من الترددات من خلال تحديد إشارة الدخل باستخدام الأزرار الموجودة على واجهة محلل الشبكة. تتوفر محللات الشبكة بقدرات ومواصفات مختلفة تخدم مختلف التطبيقات وتغطي مناطق مختلفة من الطيف الراديوي ويوجد في الأسواق محللات تغطي كامل الطيف الراديوي بتردد أعلى يصل إلى مائة جيغاهيرتز ولكنها باهضة الثمن يصل سعر الواحد منها 50 ألف دولار.

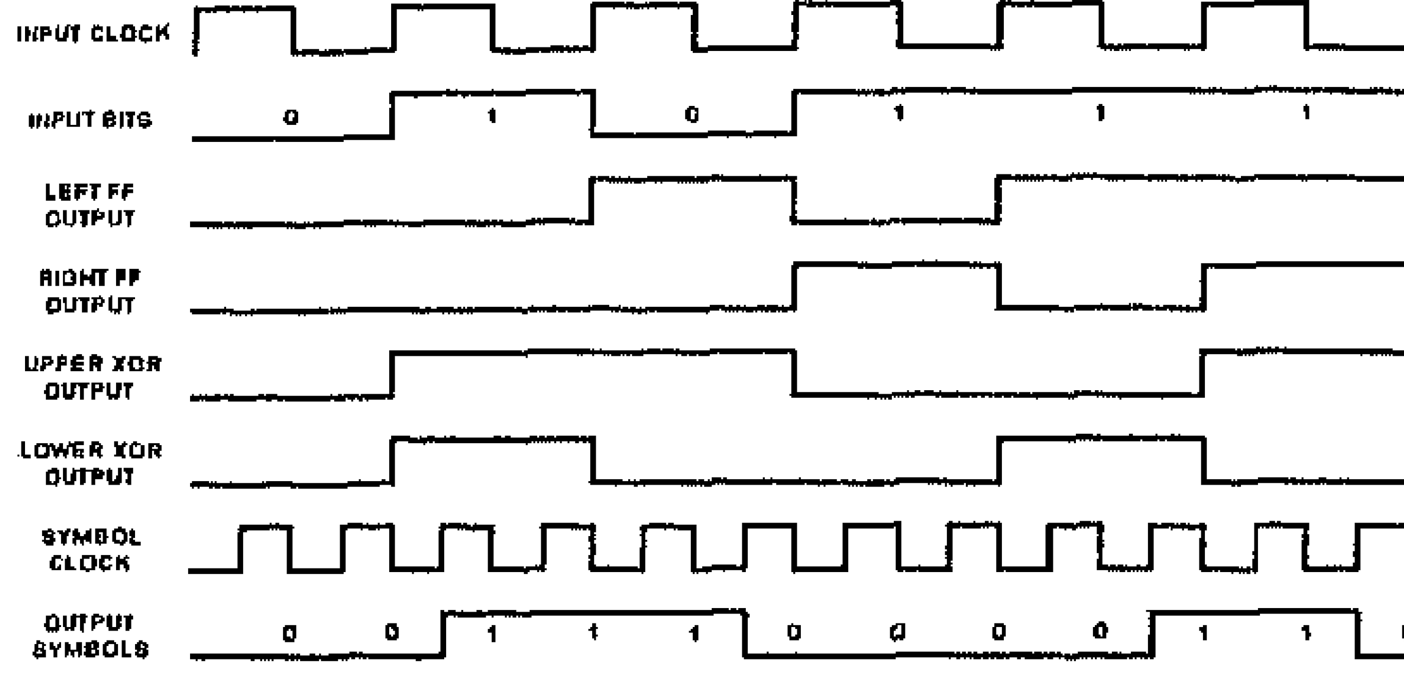


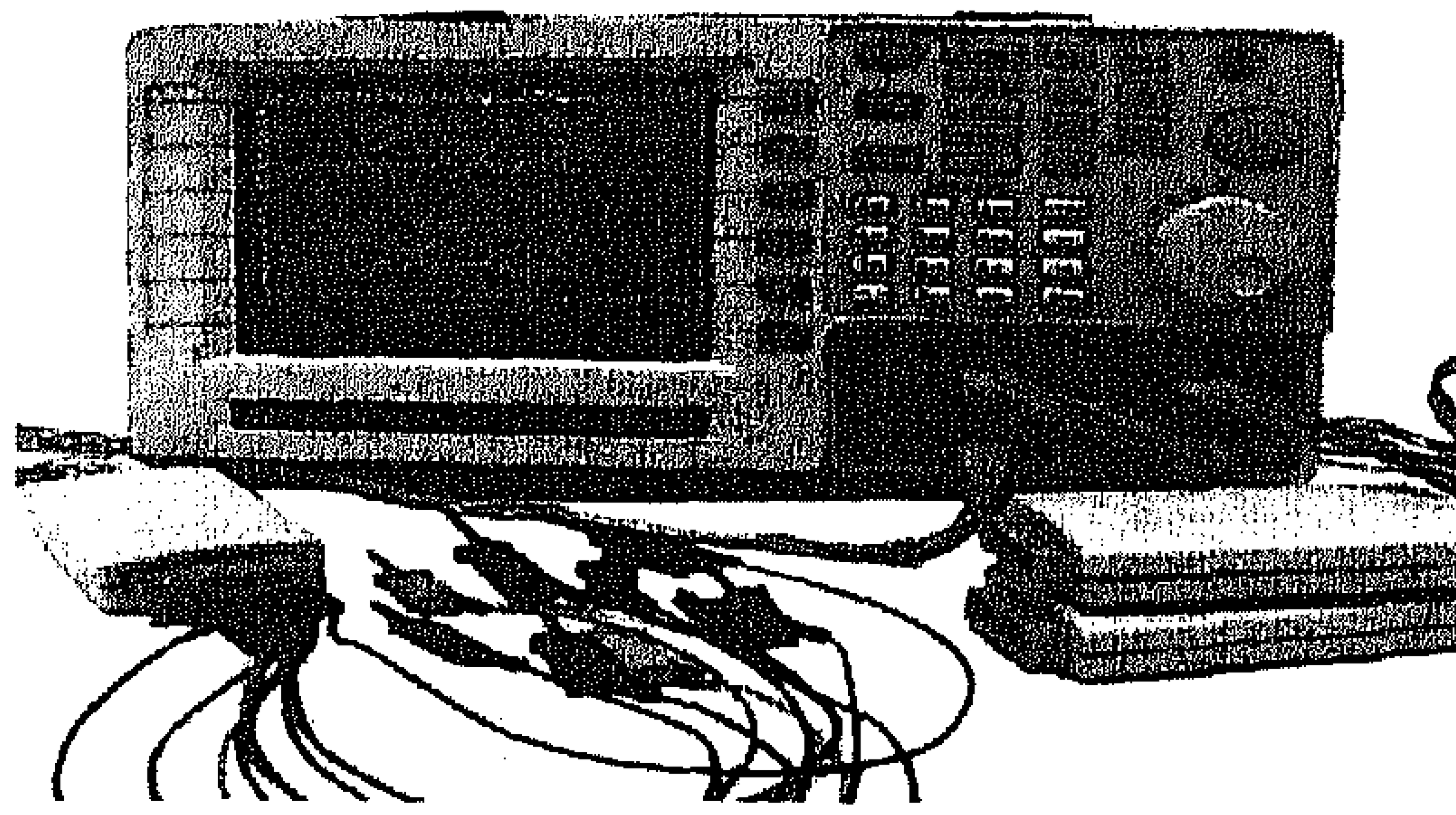


S-Parameters, Linear Theory

محلل المنطق الرقمي (Digital Logic Analyzer)

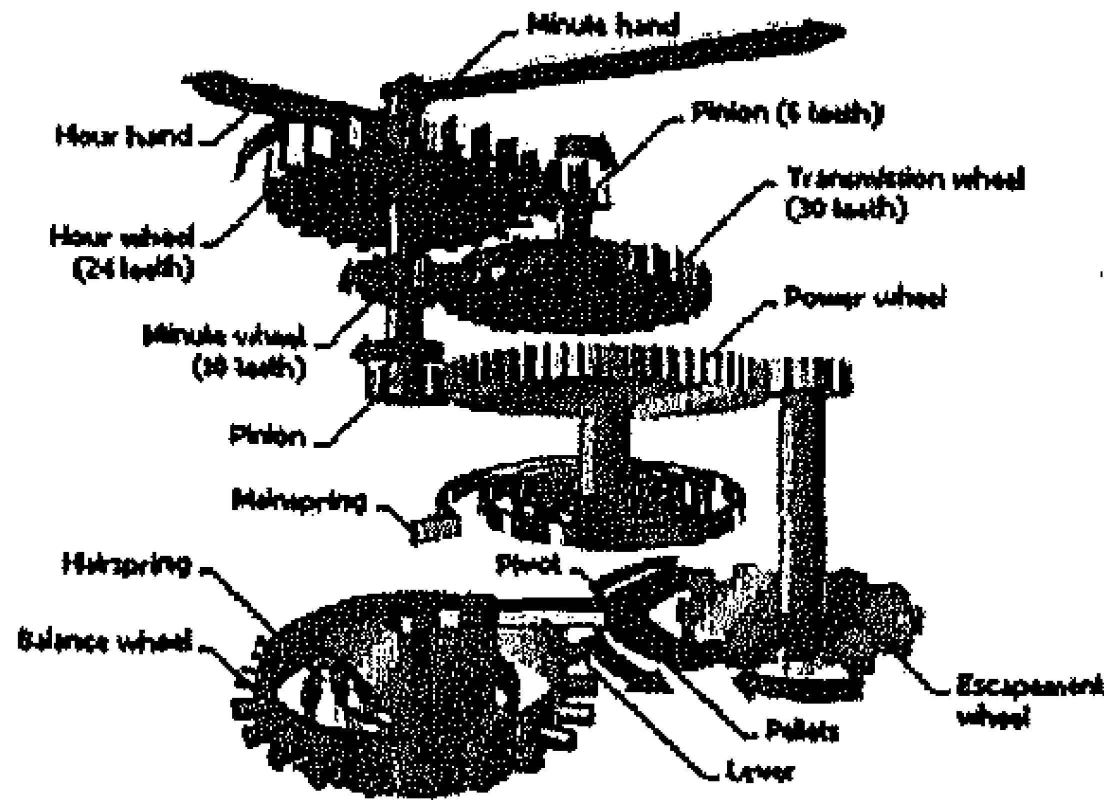
يستخدم محلل المنطق الرقمي (digital logic analyzers) لفحص الإشارات الرقمية عند نقاط مختلفة على الدوائر الرقمية والمنطقية وذلك للتأكد من سلامة أشكالها من التشويه (distortion) والضجيج (noise) وتحديد أوقات تغير حالة الإشارات (signal state) بالنسبة لبعضها البعض أو ما يسمى بمخطط التوقيت الرقمي (digital timing diagram). ومخطط التوقيت هو عبارة عن مجموعة من الإشارات الرقمية الثنائية المقاسة عند أماكن مختلفة في الدائرة قيد الفحص يتم رسمها كدوال مع الزمن بوجود إشارة ساعة التوقيت (clock). ومن المعلوم أن التزامن (synchronization) في وصول الإشارات الرقمية إلى أجزاء النظام الرقمي شرطا أساسيا لعمل النظام بشكل صحيح حيث أن التأخير الزمني (time delay) في وصول الإشارات إلى أماكن تأثيرها يؤدي إلى فشل عمل كامل النظام. ومن أهم مواصفات محلل المنطق سرعة ساعة التوقيت (clock speed) والتي قد تصل في بعض الأنواع إلى 1000 ميجاهيرتز وأما المواصفة الثانية فهي عدد الإشارات التي يمكن قياسها وتحليلها وإظهارها على الشاشة والتي قد يصل عددها إلى 32 إشارة.

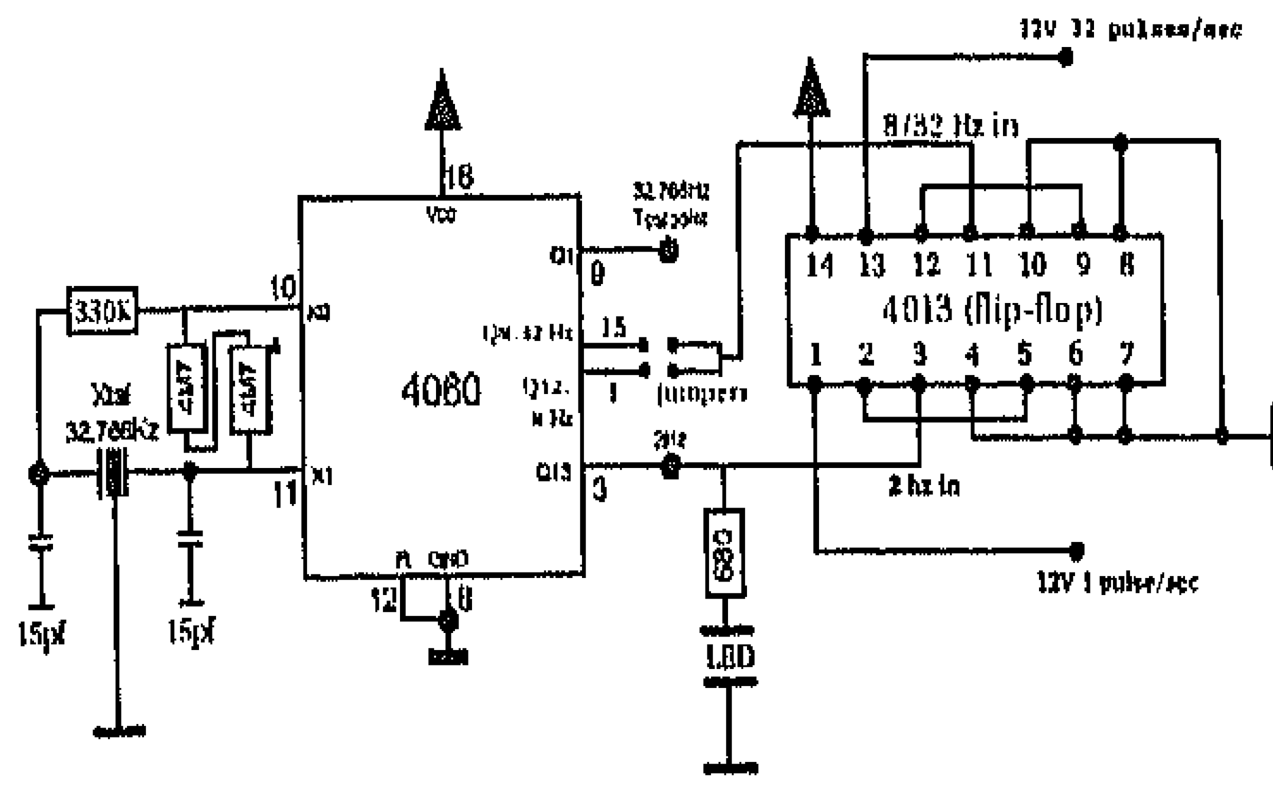




7-12 قياس الزمن والمؤقتات (Time Measurements & Timers)

تستخدم مقاييس الزمن أو الساعات (clocks) لتحديد اللحظة الحالية من الزمن وكذلك لقياس طول الفترة الزمنية التي يستغرقها حدوث حدثا ما أو الفترة الزمنية بين حدثين متتالين أو كمؤقت (Timer) يحدد الفترة الزمنية التي يعمل خلالها جهاز ما أو يحدد اللحظات الزمنية لسلسة من الأحداث. ومع ظهور التقنيات الحديثة أصبحت الحاجة ماسة لساعات ومؤقتات بالغة الدقة لقياس فترات زمنية متناهية في الصغر قد تقل عن جزء من بليون بليون جزء من الثانية (attosecond). لقد استخدم البشر قبل القرن الرابع عشر الساعات الشمسية والمائية والرملية وأنواع من الساعات الميكانيكية المشغلة بقوة الماء لقياس الزمن بشكل تقريبي . وفي القرن الرابع عشر تم اختراع الساعات الميكانيكية المحكومة بعجلة الاتزان (balance wheel) والمشغلة بقوة الزمبركات لتكون أول أنواع الساعات المحمولة. وابتداءا من النصف الثاني من القرن السادس عشر تمكن العالم جاليليو من اختراع

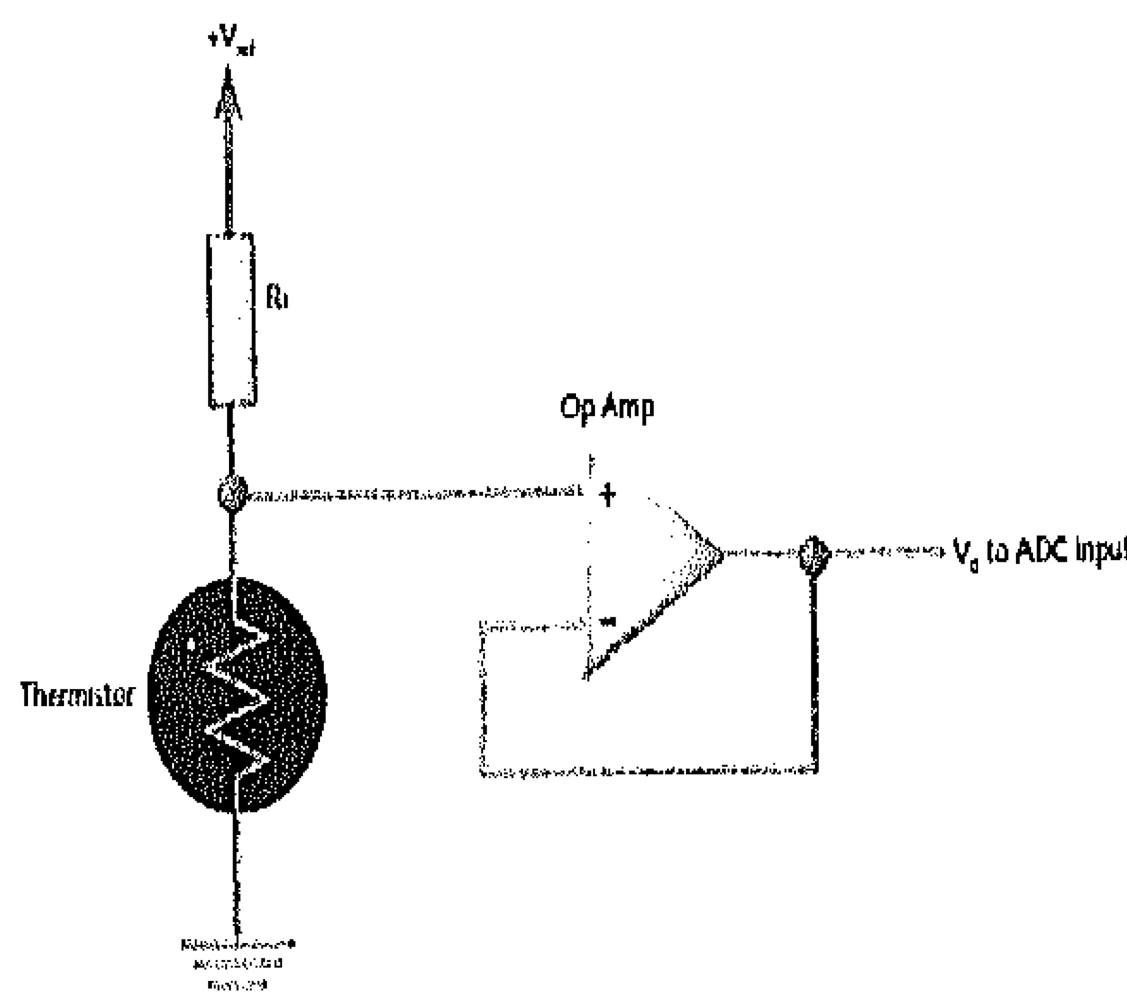




الساعات الميكانيكية والتي تعتمد في تحديد الزمن على حركة البندول تحت تأثير الجاذبية الأرضية وقد تم استخدام الطاقة الميكانيكية المخزنة في الزمبركات للحفاظ على حركة البندول بشكل متواصل. وفي النصف الثاني من القرن التاسع عشر تم اختراع الساعات الكهربائية والتي تستخدم المحركات الكهربائية ذات السرعة الثابتة لتحديد الزمن.

وفي بداية القرن العشرين تم اختراع الساعات الإلكترونية والتي تستخدم المذبذبات البلورية (crystal oscillator) لضبط الوقت وبدقة تزيد بعشرات الأضعاف عن دقة أفضل الساعات الميكانيكية. وتعتمد دقة المذبذبات البلورية على دقة قطع البلورة بالأبعاد والشكل المناسب حيث أن التردد يعتمد على سمك البلورة وغالبا ما تستخدم البلورات ذات التردد البالغ 32768 هيرتز في معظم الساعات اليدوية. ومن ميزات الساعات الإلكترونية غياب الأجزاء المتحركة فيها وكذلك إمكانية الحصول على فترات زمنية متناهية في الصغر من خلال استخدام المفسمات الرقمية (digital dividers) والمهتزات أحادية الاستقرار (monostable multivibrators) بدلا من التروس في الساعات اميكانيكية. وفي بداية النصف الثاني من القرن العشرين تم استتخدام الساعات الذرية لضبط الوقت وبدقة تزيد مئات المرات عن دقة الساعات الالكترونية. وتعتمد الساعة الذرية في عملها على الترددات البالغة الدقة التي تشعها بعض العناصر الطبيعية كالسيزيوم والروبيديوم عند إنتقال الإلكترونات بين مداريين معلومين. ويتم تصنيع الساعة الذرية من خلال وضع العنصر المناسب في فجوة رنين (resonant cavity) لها تردد رنين يساوي التردد المنبعث من العنصر ومن ثم يتم إثارة الإلكترونات بمصدر طاقة مناسب فتبدأ دائرة الرنين بالتناغم مع التردد المنبعث من العنصر والذي يتم استخدامه بعد تخفيضه إلى ترددات معينة في عملية ضبط الوقت. ويتم اختيار نوع الساعة ومقدار دقتها تبعا للتطبيق فبعض التطبيقات لا يحتاج ضبط عمل أجهزتها إلا إلى ساعات إلكترونية بسيطة بينما تلزم ساعات ذرية لتطبيقات أخرى كما في أنظمة الاتصالات الضوئية وشبكات المعلومات عالية السرعة وفي أنظمة تحديد الموقع.

8-12 الحساسات (Sensors) والمصوغات (Transducers)

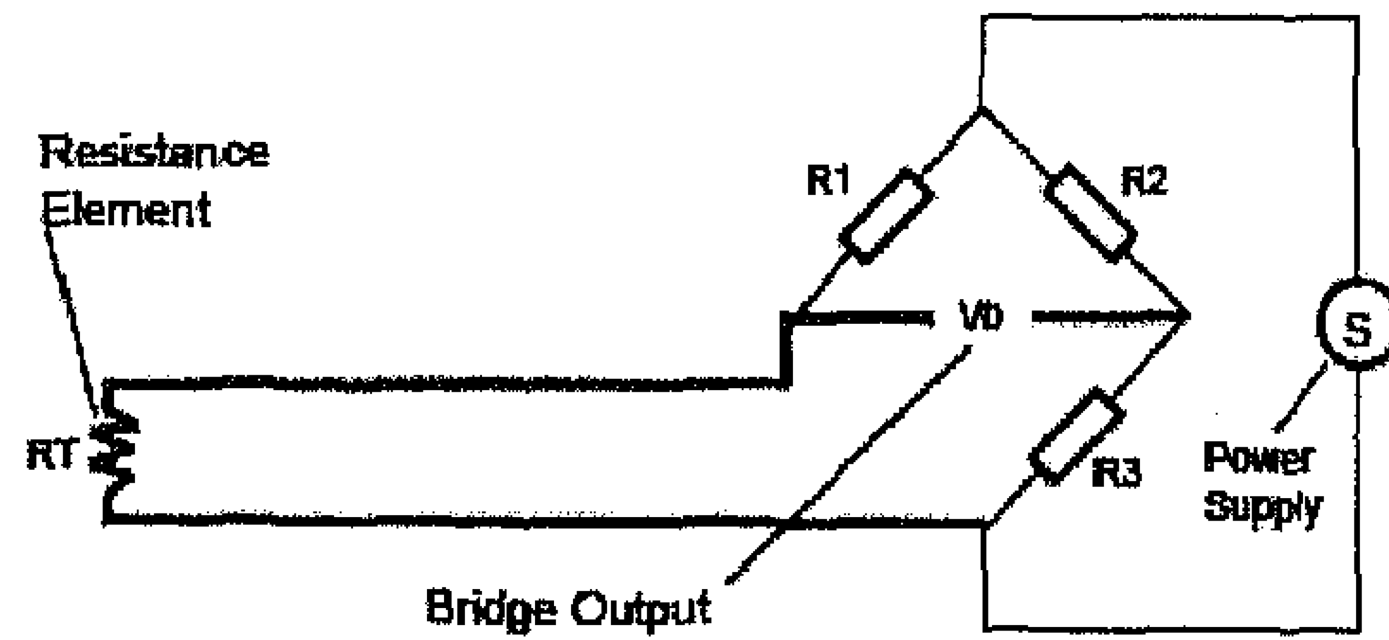


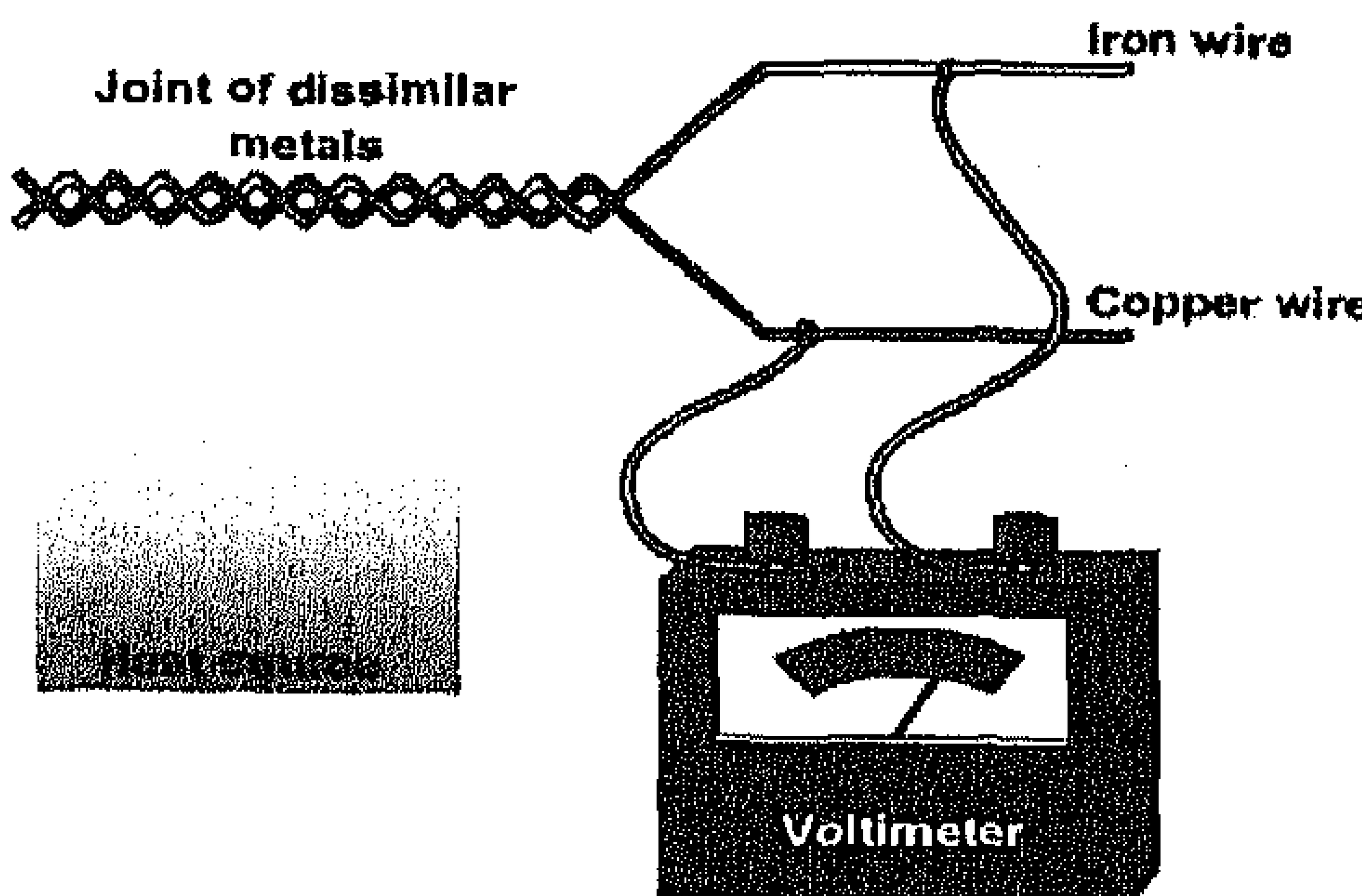
تستخدم الحساسات والمصوغات لتحويل مختلف أشكال الإشارات غير الكهربائية إلى إشارات كهربائية ليتم معالجتها ونقلها وتخزينها باستخدام الأجهزة والمعدات الإلكترونية وكذلك تحويل الإشارات الكهربائية المعالجة إلى شكلها الأصلي غير الكهربائي وغالبا ما يطلق على المصوغات التي تقوم بهذه العملية العكسية اسم المشغلات (Actuators). وعلى الرغم من أن الكثير يستخدم كلمتي الحساسات والمصوغات لتتدل على نفس المعنى إلا أن هناك فرقا بين مدلول المصطلحين فالحساس هو جهاز إلكتروني يقوم بتوليد جهد أو تيار كهربائي عند تعرضه لشكل من أشكال الطاقة كالخلية الشمسية (solar cell) التي تحول الطاقة الضوئية إلى

طاقة كهربائية والمزدوج الحراري (thermocouple) الذي يحول الطاقة الحرارية إلى طاقة كهربائية. أما المصوغ فهو جهاز إلكتروني يحتاج إلى تزويده بالطاقة الكهربائية ليتمكن من تحويل الكمية الفيزيائية إلى كمية كهربائية كالميكرفون الذي يحول الطاقة الميكانيكية في الصوت إلى طاقة كهربائية أو (strain guage) التي تحول الضغط إلى إشارة كهربائية. ويوجد أنواع لا حصر لها من الحساسات والمصوغات تستخدم لتحويل مختلف أنواع الإشارات التي تحمل في طياتها معلومات ما على شكل طاقة غير كهربائية إلى إشارات كهربائية وبالعكس. ويمكن تصنيفها إما تبعا لنوع الطاقة الأصلية المسلطة عليها كتلك الحساسة للطاقة الميكانيكية والحرارية والضوئية والإشعاعية والكيميائية وإما تبعا لوظيفة القياس التي تقوم بها كقياس الوزن أو الطول أو الرطوبة أو الحرارة أو القوة أو التسارع وغير ذلك.

حساسات ومصوغات درجة الحرارة (Temperature Sensors & Transducers)

تستخدم الحساسات والمصوغات لقياس درجة الحرارة (thermometers) لا لغرض القياس فقط بل لضبط درجة حرارة المكيفات في البيوت والمكاتب والمستشفيات والبيوت الزجاجية ولضبط درجة حرارة الأفران المستخدمة في مختلف أنواع الصناعات. ويوجد أنواع كثيرة من هذه الحساسات والمصوغات إلا أن أهمها نوعان فالنوع الأول هو مصوغ ويعتمد في عمله على ظاهرة التغير في قيمة المقاومات مع التغير في درجة الحرارة وتسمى مصوغات المقاومة (resistive transducer). ويستخدم في هذا النوع إما بعض أنواع المعادن (metals) وتسمى هذه كاشف الحرارة بالمقاومة (resistance temperature detector (RTD) وله ميزة أنها تغطي مدى واسع من درجات الحرارة قد تصل إلى 1000 درجة مئوية أو باستخدام بعض أنواع المواد شبه الموصلة أو السيراميك (semiconductor or ceramic) ويسمى هذا النوع الثيرمستور (thermistor) وتتميز بحساسيتها العالية إلا أن مداها أقل لا يتجاوز 100 درجة مئوية. ويلزم لعمل هذا النوع من مقاييس الحرارة كونها مصوغات وضعها في دائرة كهربائية والتي غالبا ما تكون على شكل جسر ويتستون (Wheatstone bridge) أو من خلال وصلة على التوالي مع مقاومة كهربائية. أما النوع الثاني فهو من النوع الحساس وهو المزدوج الحراري (thermocouple) والذي يعتمد في عمله على تأثير سيبك (Seebeck effect) والذي اكتشفه الفيزيائي الأستوني ثوماس سيبك(Thomas Seebeck) في عام 1821م. ومفاد تأثير سيبك أن أي وصلة (junction) بين معدنيين مختلفين تولد فرقا في الجهد بين أطرافها يتناسب مع درجة حرارة الوصلة ويعتمد ثابت التناسب على نوع المعدنين. ولذلك يوجد أنواع كثيرة من

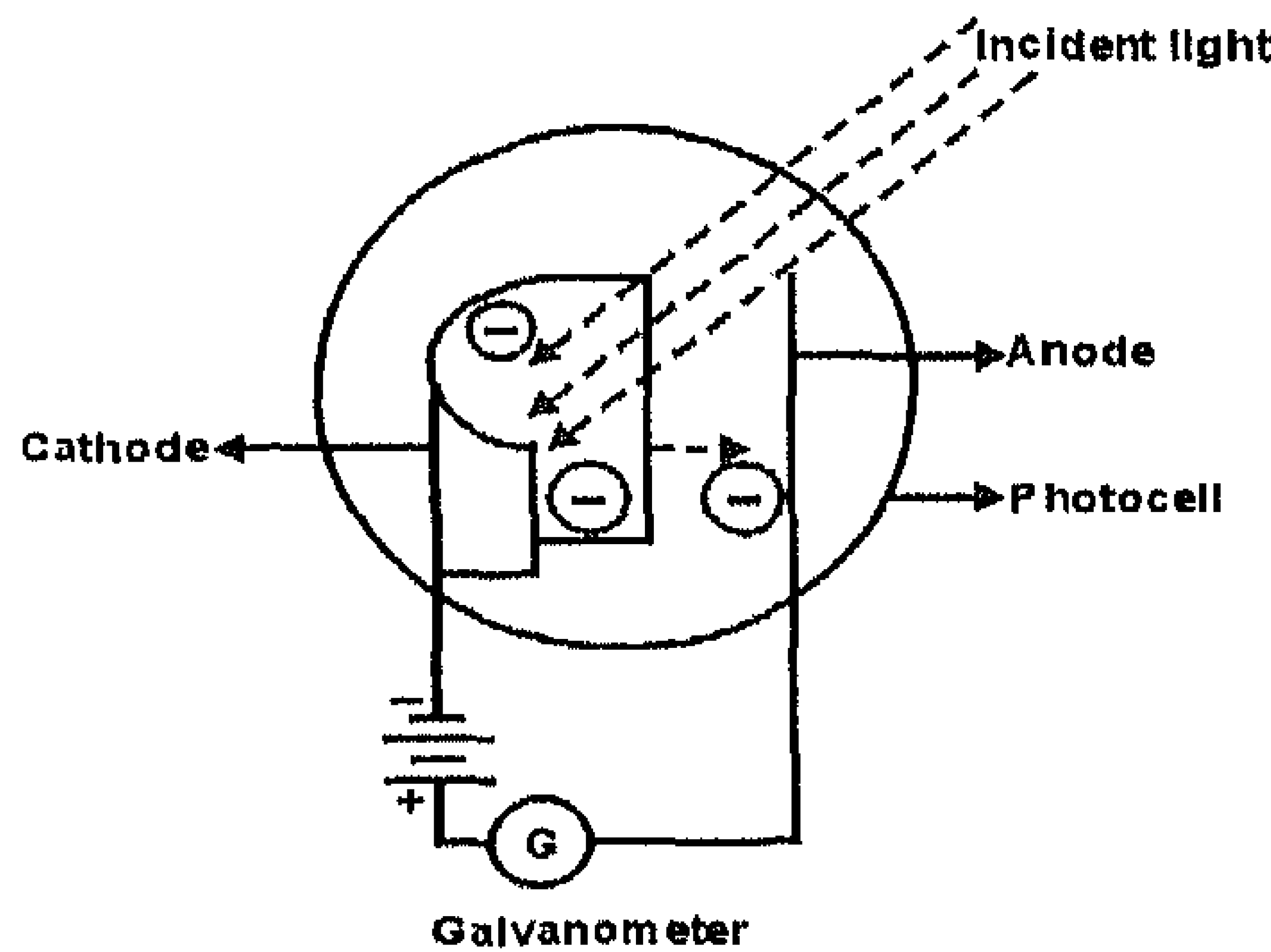




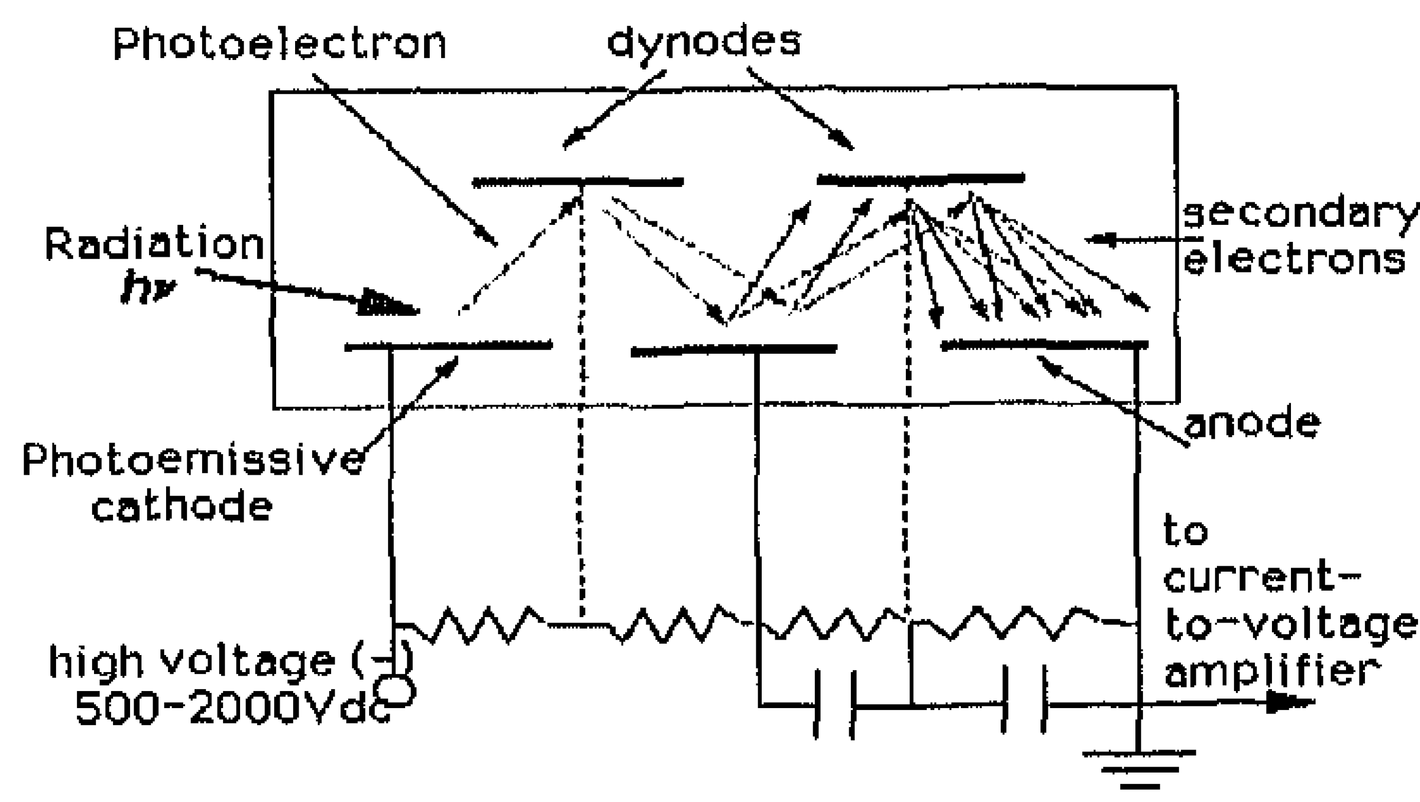
المزدوجات الحرارية تستخدم مختلف أنواع المعادن وتتفاوت فيما بينها بقيمة ثابت التناسب الذي كلما زاد كلما زادت حساسية القياس وبمدى درجات الحرارة التي يمكن لها أن تقيسها. فمزدوج الكروم والألمنيوم وهو الأشهر له مدي بين – 270 إلى 1370 درجة مئوية وحساسية تبلغ 41 ميكروفولت لكل درجة مئوية وأما مزدوج الكروم والكنستانتان له مدي بين – 270 إلى 920 درجة مئوية وحساسية تبلغ 68 ميكروفولت لكل درجة مئوية وهي الأعلى وأما مزدوج البلاتين واالروديوم والذي يقيس أعلى درجة حرارة فله مدي بين – 50 إلى 1760 درجة مئوية وحساسية تبلغ 10 ميكروفولت لكل درجة مئوية وهي منخفضة نسبيا.

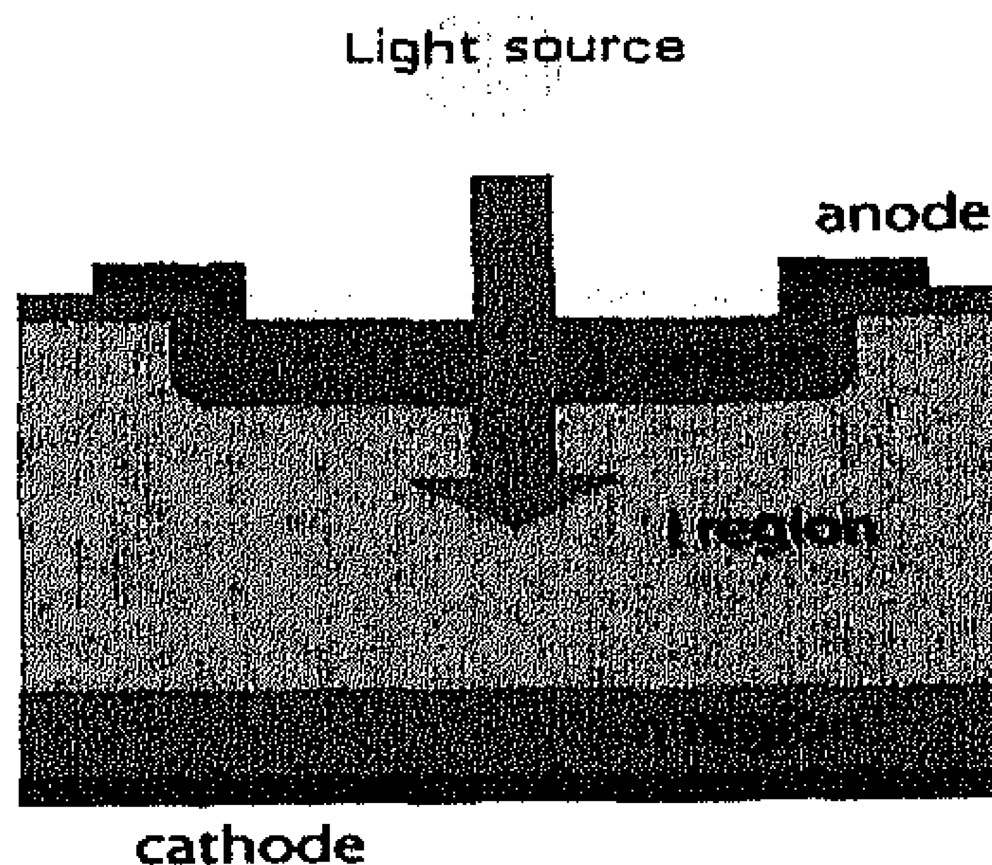
حساسات ومصوغات الضوء (Light Sensors & Transducers)

تستخدم حساسات ومصوغات الضوء في ما يطلق عليها الكاشفات الضوئية (light detectors) والتي تقوم بتوليد تيار كهربائي يتناسب مع كمية الضوء الساقط عليها وتستخدم في تطبيقات لا حصر لها كما في الكميرات التلفزيونية وأنظمة الاتصالات الضوئية. ويوجد ثلاثة أنواع رئيسية من الكاشفات الضوئية وهي الكاشفات الضوئية الباعثة (photoemissive detector) والكاشفات الضوئية الموصلة (photoconductive detector) والكاشفات الضوئية الفولتية (photovoltaic detector).

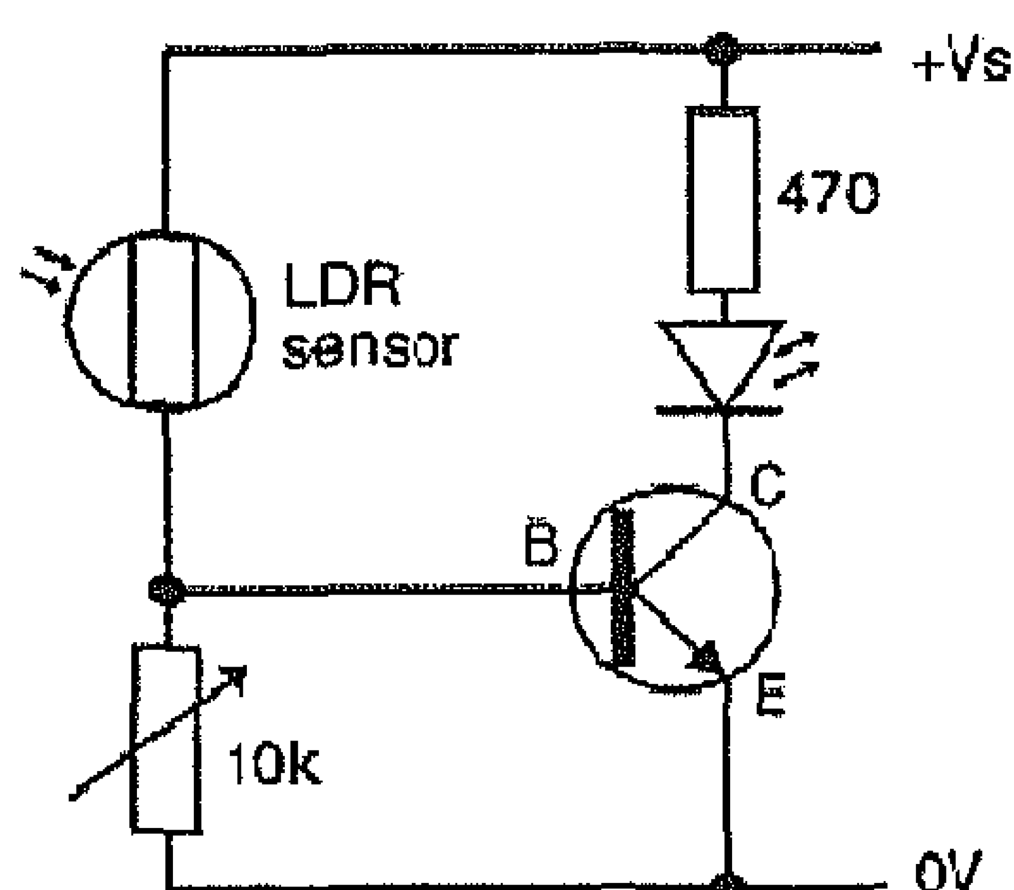


ولكل نوع من هذه الكاشفات الضوئية ميزاتها وسيئاتها من حيث مدى أطوال الموجات (wavelength) التي يمكنها كشفها والاستجابة (responsivity) وهي مقدار التيار المتولد بالأمبير لكل واط من الطاقة الضوئية التي تسقط عليها إلى جانب سرعة استجابتها وحجمها ومقدار الجهد الكهربائي اللازم لتشغيلها. وتعتمد الكاشفات الضوئية الباعثة في عملها على ظاهرة التأثير الكهروفوتوني (photoelectric effect) الذي اكتشفها الفيزيائي الألماني هينرتش هيرتز (Heinrich Hertz) أثناء إجراء تجاربه التي تتعلق بتوليد الموجات الكهرومغناطيسية وذلك في عام 1887م. ومفاد هذه الظاهرة أنه عند تسليط موجات كهرومغناطيسية كالضوء مثلا على أسطح المعادن فإن سيلا من الإلكترونات سينبعث من هذه الأسطح إذا ما زاد تردد هذه الموجات عن حد معين. ويتم تصنيع الكاشف الضوئي من هذا النوع من خلال وضع السطح المعدني المعرض للضوء داخل أنبوب زجاجي مفرغ من الهواء في مقابل سطح

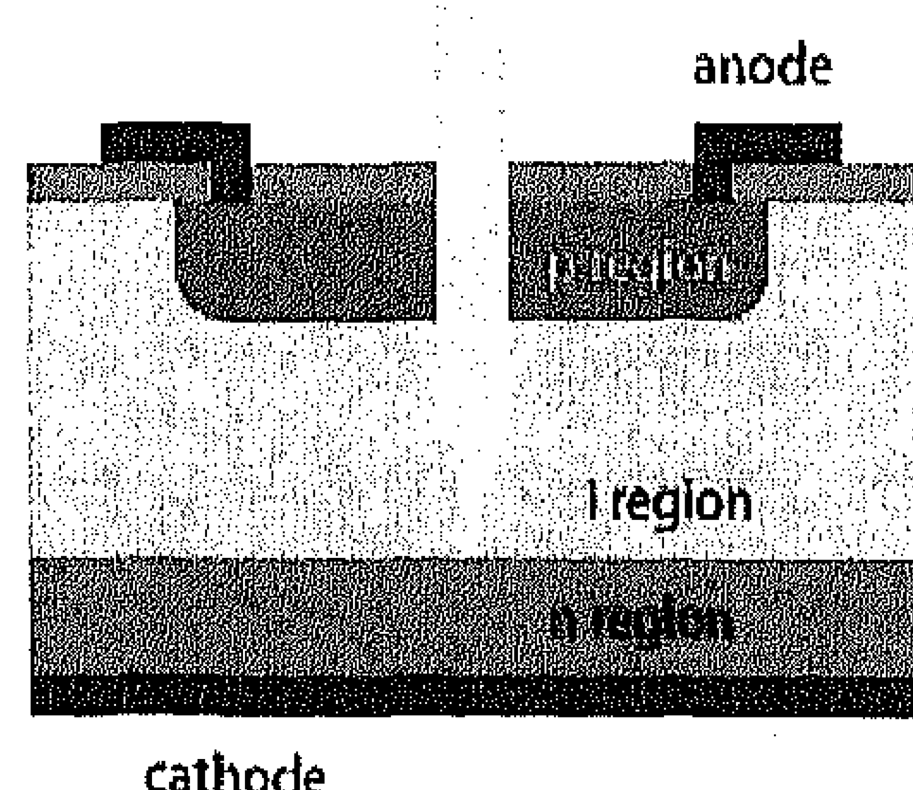




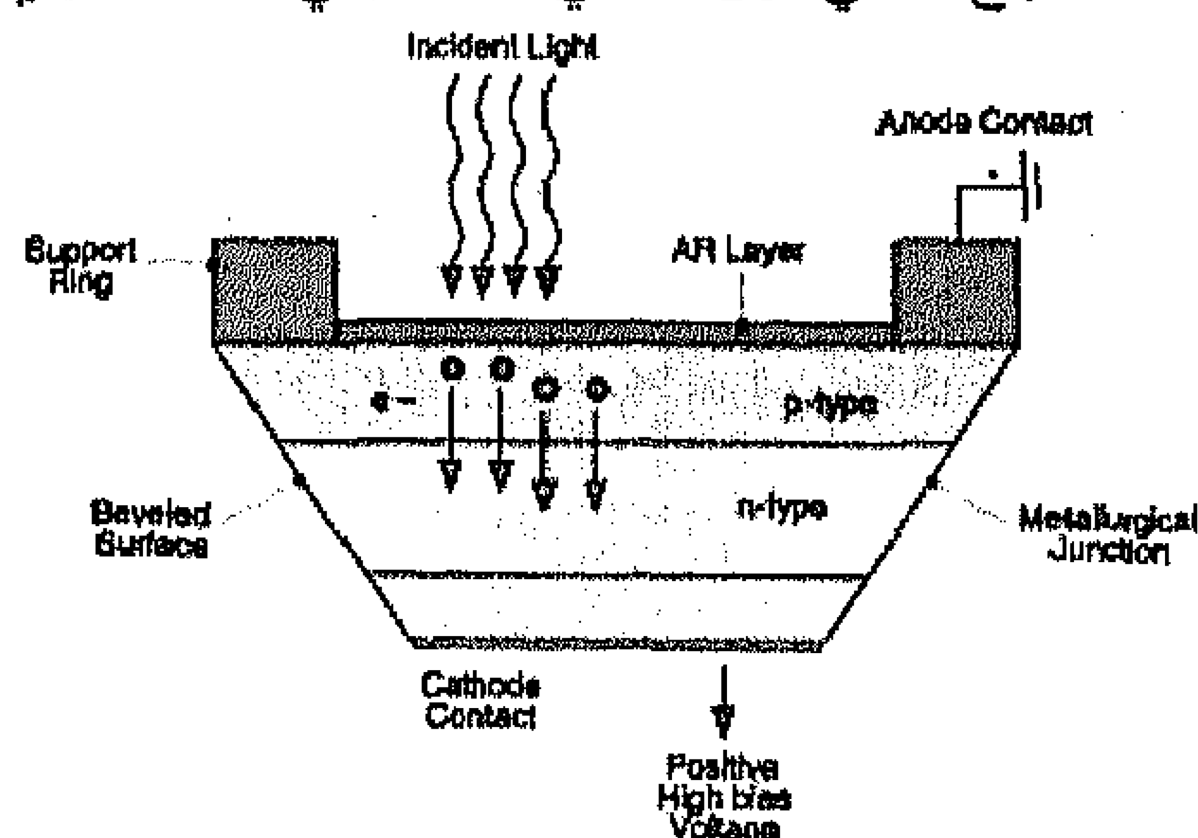
معدني آخر ويسلط على طرفيهما جهد كهربائي بحيث يكـون السـطح المعـرض للضـوء هـو المهـبط (Cathode) والسطح الآخر هو المصعد (Anode). وعند سـقوط الضـوء علـى سـطح المهـبط فـإن الإلكترونات المنبعثة ستنجذب من قبل المصعد بسبب المجال الكهربائي وتكمل مسارها في الدائرة الخارجيـة منتجة تيارا كهربائيا للناسب قيمته مع شدة الضوء الساقط. ويمكن زيادة حساسية الكاشف من خـلال مـا يسمى المضاعفات الضوئية (Photomultipliers) حيث يلزم توليد مجالات كهربائيـة عاليـة بـين عـدة مصاعد ومهابط باستخدام جهود عالية تصل لعدة آلاف فولت. وعندما تتسارع الإلكترونات الابتدائية المتولدة من السطح المعرض للضوء فإنها تقوم بإنتاج إلكترونات جديدة عند اصطدامها بالأسطح البينة مما يؤدي إلى مضاعفة عدد الإلكترونات وبالتالي مضاعفة التيار الخارجي.



أما النوع الثاني من الكاشفات وهو الكاشف الضوئي الموصل (photoconductive detector) فيعتمد في عمله على انخفاض قيمة مقاومة بعض المواد عند سقوط الضـوء عليها ولذا يطلق عليها المقاومات المعتمـدة علـى الضـوء (light-dependent resistor (LDR)). إن أكثر المـواد المستخدمة في هذه الكاشفات هي المـواد شـبه الموصـلة كالسيليكون والجرمانيوم وكبريتيد الرصاص ويعتمـد طـول موجة الضوء التي يمكن كشفها على مقـدار طاقـة فرجـة النطاق (bandgap energy). فالسيلكون لا يكشف إلا الضوء الذي لا يتجاوز طول موجتـه ميكرومتـر واحد بينما يصل طول الموجة في كاشف كبريتيد الرصاص إلى 3 ميكرومتر. ويلزم لعمل هذه الكاشـفات



وضعها في دائرة كهربائيـة كجسـر ويتسـتون (Wheatstone bridge) أو على التوالي مع مقاومة ثابتة. وأما النوع الثالث مـن الكاشفات الضوئية فهو الكاشف الضوئي الفـولتي (photovoltaic detector) وهو يختلف عن النوع الثاني من أنه مبني من مادة شبه موصلة على شكل وصلة (PN junction) وليس كمقاومة. وإذا ما تم استخدام هذا النوع لكشف الضوء فإنه يسمى الثنـائي الضـوئي (photodiode) أما إذا ما استخدم لتوليد الطاقـة الكهربائيـة مـن الطاقة الشمسية فإنه يسمى الخلية الشمسية (solar cell). ويوجد نوعان من الثنائيات الضوئية فـالنوع الأول هو الثنائي الضوئي العادي (pin photodiode) وهو عبارة عن وصلة (PN) مع وضـع منطقـة غيـر مطعمة في المنتصف لزيادة المساحة التي تجمع الضوء أما النوع الثاني فهو الثنائي الضـوئي الانهيـاري

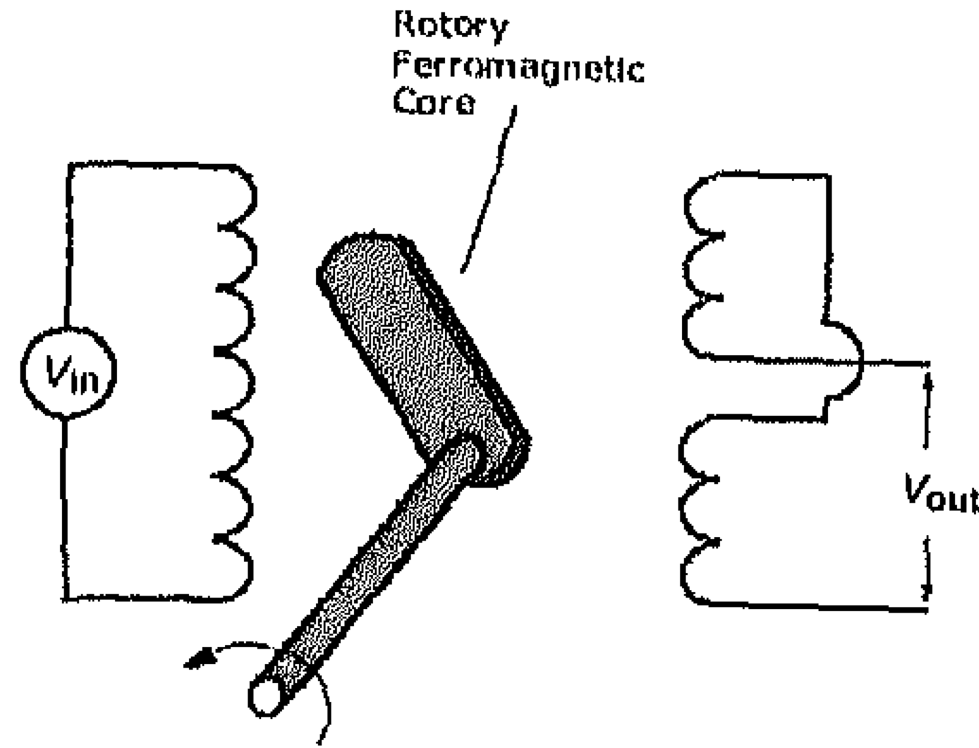


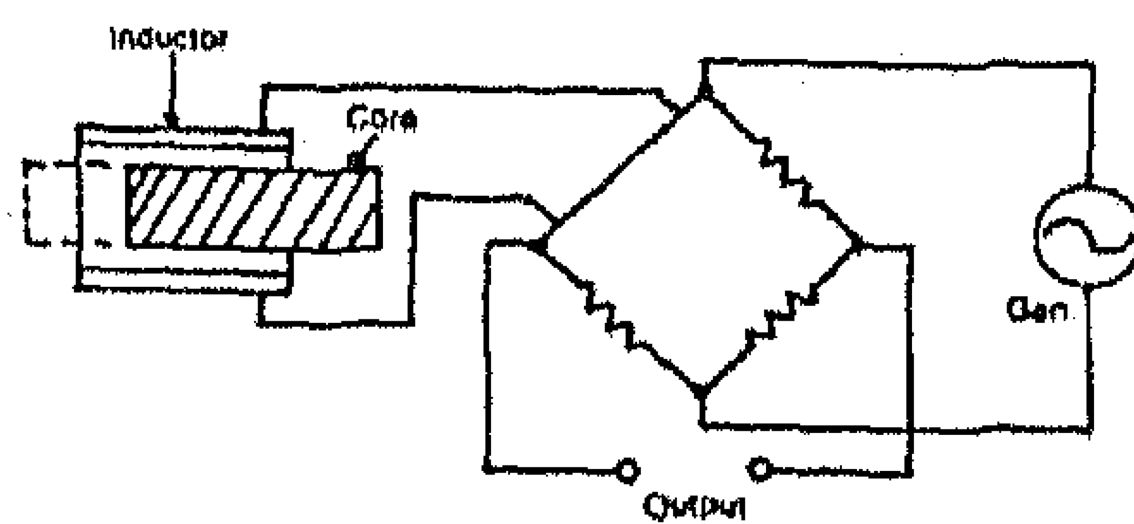
(avalanche photodiode APD) والذي يتميز على سابقه بقدرته على تضخيم التيار المتولد ولكن باستخدام جهد كهربائي عالي يصل لعدة عشرات مـن الفولـت. وتستخدم المواد شبه الموصلة المختلفة لبناء الثنائيـات الضوئية كالسيليكون والجرمانيوم وأرسـينيد الجـاليوم وغيرها حيث يعتمد طول الموجات الملتقطة على طاقة فرجة النطاق كما في النوع الثاني. ويمكن بناء الكاشف

الضوئي على شكل ترانزستور يسمى الترانزستور الضوئي (phototransistor) والذي يتميز على الثنائي الضوئي بقدرته على تضخيم التيار بدون الحاجة لرفع الجهد كما هو الحال مع الثنائي الضوئي الانهياري.

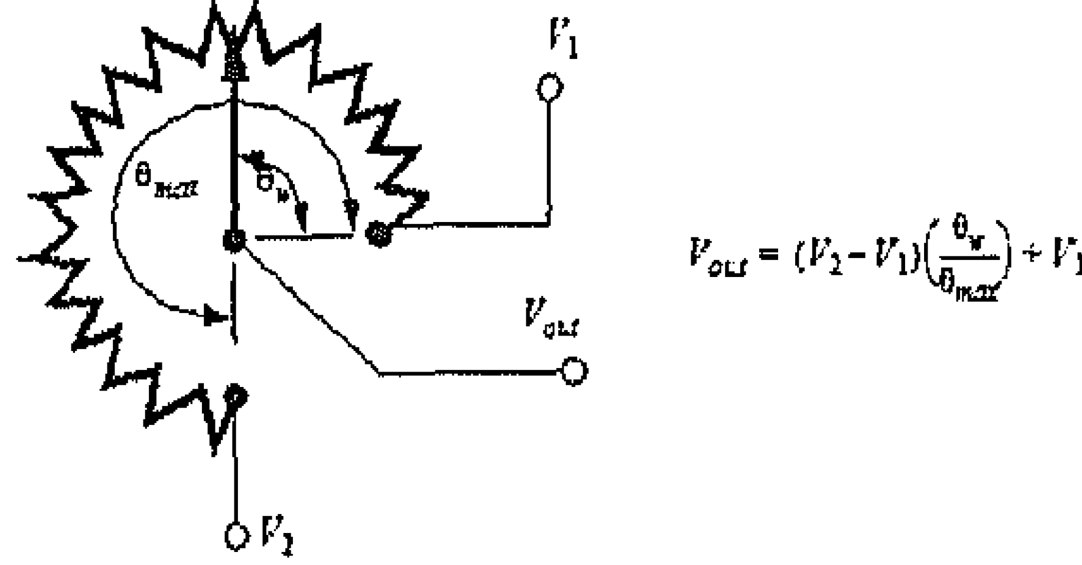
مصوغات القوة والضغط (Force & Pressure Transducers)

تستخدم مصوغات القوة والضغط في تطبيقات لا حصر لها حيث يوجد أنواع كثيرة من هذه المصوغات لها مواصفات متفاوتة تتناسب مع التطبيق المعني من حيث مقدار القوة أو الضغط والدقة في القياس وغيرها. ومن أهم هذه الأنواع مقاييس الإجهاد (Srain Gauges) والمصوغات من النوع الحثي (inductance-type transducer) والمصوغات من النوع السعوي (capacitive-type transducer) والمصوغات الكهرومغناطيسية (electromagnetic transducer) والمصوغات الكهروضغطية (Piezoelectric transducers) ومصوغات المقاومة المتغيرة (potentiometric transducer). فمقياس الإجهاد (Srain Gauge) هو عبارة عن مصوغ يستخدم لقياس مقدار الإجهاد التي تتعرض له الأجسام عند تعرضها لمختلف أنواع القوى من شد أو دفع أو التواء حيث يحدث تشوه مؤقت لأبعاد هذه الأجسام. ويوجد أنواع مختلفة من مقاييس الإجهاد أشهرها التي تعتمد على التغير في قيمة مقاومة الأسلاك عند تعرضها للإجهاد ويتكون هذا المقياس من سلك معدني رقيق على شكل شريط يتم مده على قاعدة بلاستيكية مرنة على شكل شبكة من الخطوط المتجاورة والمتوازية ويتم إلصاق المقياس على الجسم المعرض للإجهاد وعند تمدد أو تقلص السلك المعدني فإن قيمته ستزيد أو تنقص بمقدار الإجهاد الذي يتعرض له السلك في الاتجاه الموازي للخطوط فقط وليس العامودي عليه. ويمكن قياس الإجهاد في الاتجاهات المختلفة باستخدام مقياسين للإجهاد يوضعان بشكل متعامد على سطح الجسم. ويلزم لعمل مقياس الإجهاد وضعه في دائرة كهربائية غالبا ما تكون جسر ويتستون ويجب أن يراعى عند استخدام هذا النوع من مقاييس الجهد الأخذ بعين الاعتبار تأثير درجة الحرارة على مقاومة السلك وذلك من خلال اختيار أنواع معينة للمعدن كسبائك الكونستانتان أو من خلال استخدام طرق موازنة في جسر ويتستون. أما النوع الثاني من مقاييس الإجهاد فهو الذي يعتمد على تأثير المقاومة-الضغط (piezoresistive effect) حيث أن بعض المواد شبه الموصلة كالجرمانيوم والسيليكون تتغير مقاومتها عند تعرضها للضغط. وأما المصوغ الحثي فهو عبارة عن ملف كهربائي (coil) ملفوف على قلب حديدي (iron core) بحيث يتحرك الملف أو القلب بحرية وبشكل طولي عند تعرض أحدهما



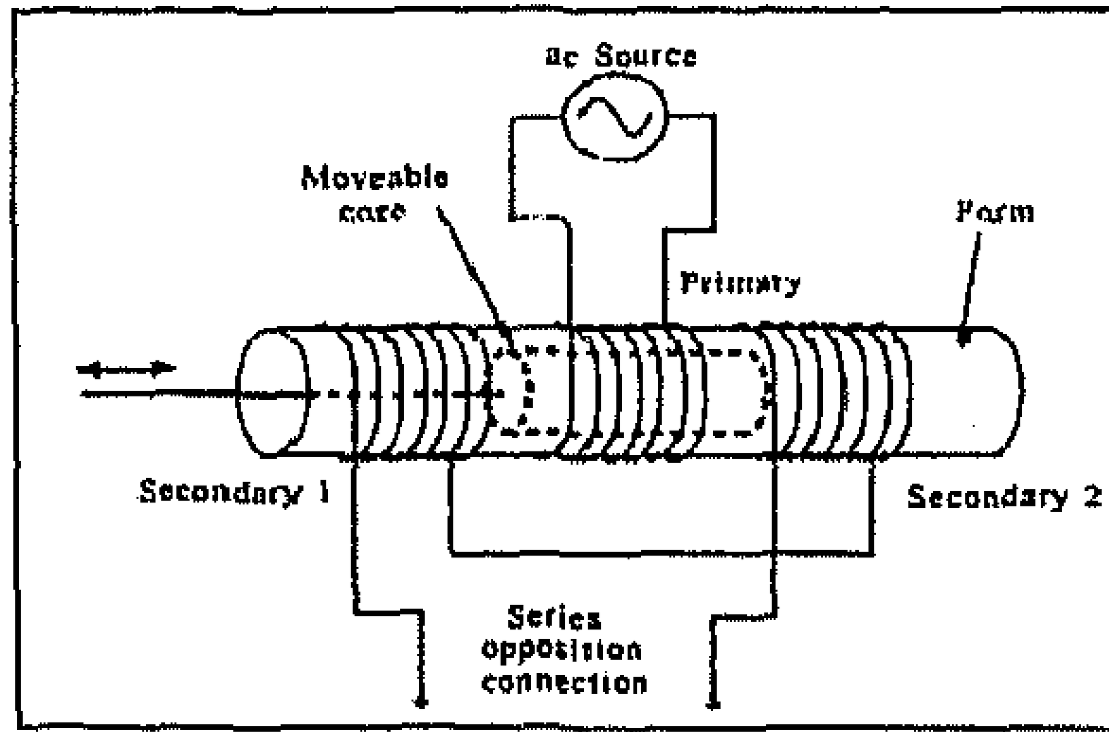


للضغط. وبما أن محاثة الملف (coil inductance) تعتمد على مقدار التداخل بين الملف والقلب فإن حركة أحدهما بالنسبة للآخر تغير قيمة المحاثة والتي يمكن تحويلها إلى تغير في الجهد الكهربائي باستخدام دائرة كهربائية مكونة من جسر ويتستون يغذي بمصدر جهد متناوب. وأما المصوغ السعوي (capacitive-type transducer) فيتكون في أبسط أشكاله من لوحين معدنيين أحدهما ثابت والآخر متحرك يفصل بينهما الهواء. وعند تحريك اللوح المتحرك من أي قوة مؤثرة فإن المسافة بين اللوحين تزيد أو تقل مما يغير من قيمة مواسعة المكثف (capacitance) والتي يتم تحويلها إلى جهد كهربائي باستخدام دائرة كهربائية شبيه لتلك المستخدمة في المصوغ الحثي. ويلزم استخدام زنبركات أو وسائد هوائية لموازنة حركة القلب الحديدي أو اللوح مع القوة المسلطة بحيث يتناسب مقدار الإزاحة خطيا مع القوة المراد قياسها. وأما المصوغات الكهروضغطية (Piezoelectric transducers) فتعتمد في عملها على التأثير الكهروضغطي حيث أن بعض المواد كالكوارتز وبعض أنواع الخزف تولد جهدا كهربائيا بين أسطحها إذا ما تعرضت للضغط.

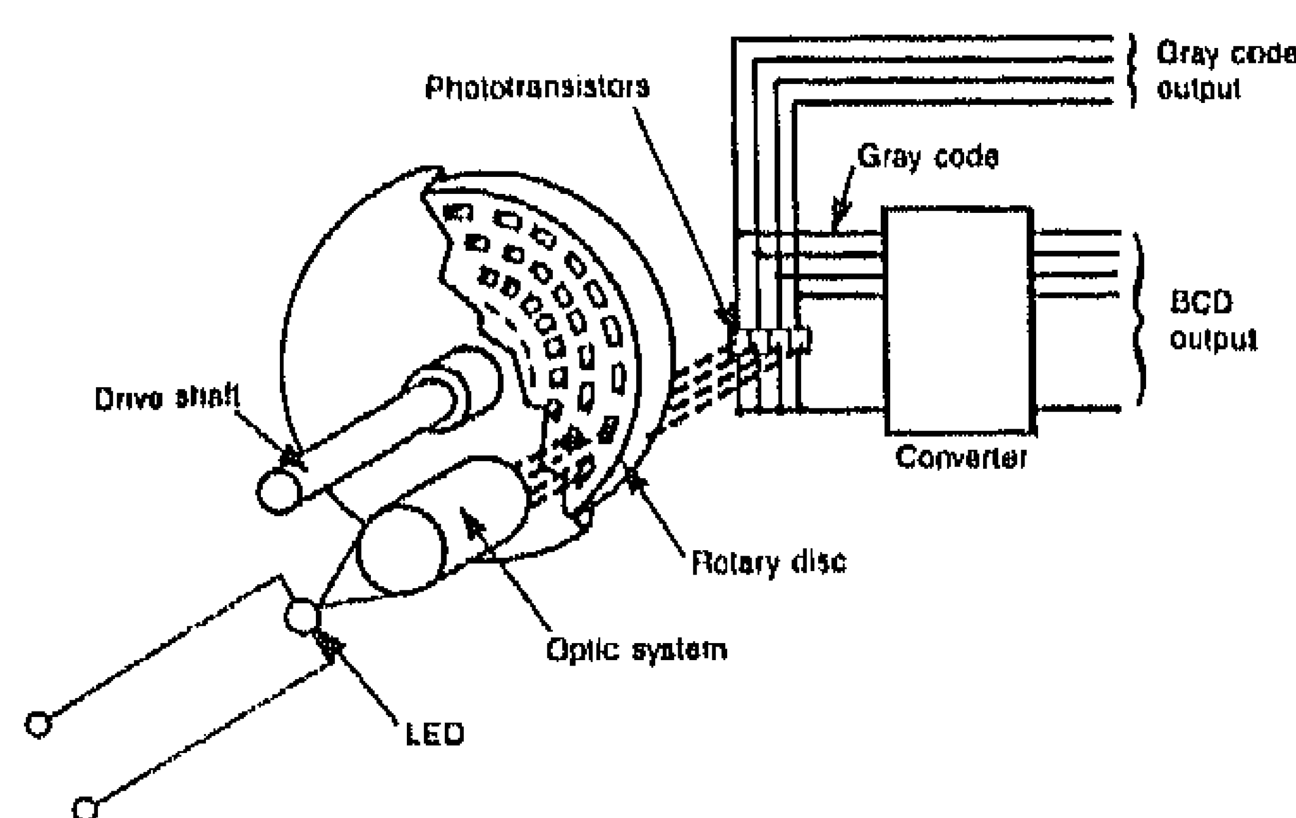


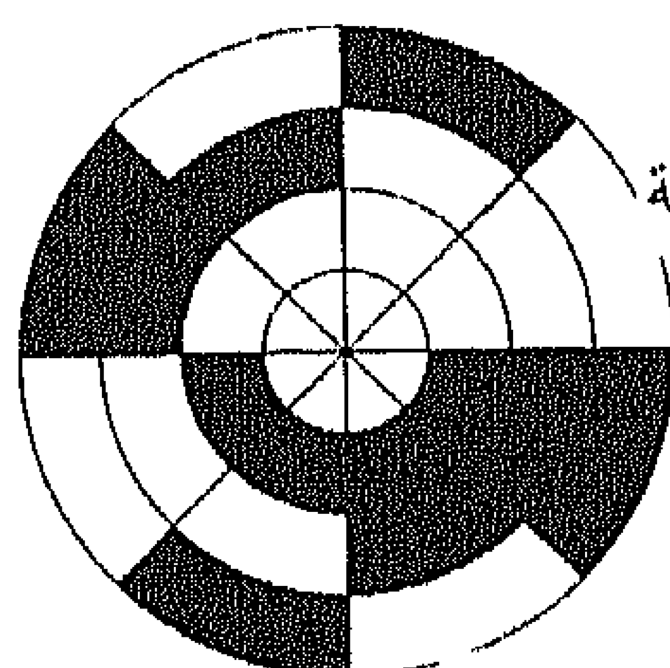
مصوغات الإزاحة والسرعة والتسارع (Length, Speed, & Accelaration Transducer)

تستخدم لقياس الإزاحة أو الإزاحة أنواع مختلفة من المصوغات تصمم لقياس إزاحات تتراوح بين الميكرومتر وعدة أمتار وذلك حسب نوع التطبيق. ومن أهم مصوغات الإزاحة مصوغ المقاومة المتغيرة (potentiometric transducer) والمصوغ السعوي ذي المساحة المتغيرة (varaible-area capacitive transducer) ومصوغ التيار الشارد (eddy current transducer) ومصوغ المحول التفاضلي المتغير الخطي (linear variable differential transformer(LVDT) transducer). ويعتبر مصوغ المحول التفاضلي أشهر وافضل المصوغات المستخدمة لقياس مقدار الإزاحة وهو مكون من ملف ابتدائي واحد ومن ملفيين ثانويين موصولين على التوالي يتم لفها حول أنبوب من مادة عازلة وفي داخل الأنبوب يوجد قلب حديدي يتحرك بحرية يمينا أو شمالا ويتم ربطه بالجسم المراد قياس إزاحته. يتم تغذية الملف الابتدائي بجهد متناوب مما يؤدي إلى ظهور جهد متناوب في الملفين الثانويين ويعتمد مقدار الجهد المتولد فيهما على موقع القلب الحديدي فهما متساويان عندما يكون القلب في المنتصف تماما ويزيد أحدهما على الآخر إذا تحرك القلب باتجاه أحدهما وابتعد عن الآخر. وإذا ما تم لف الملفين الثانويين بحيث يظهر على المخرج حاصل طرح الجهدين فإن الجهد الكلي يكون صفرا عندما يكون القلب في المنتصف ويزيد خطيا مع مقدار إزاحة القلب عن المنتصف وبإشارة تحدد إتجاه الحركة. ولقياس الإزاحة الزاوية يتم استخدام مصوغ المحول التفاضلي المتغير الدوراني (rotational variable differential transformer (RVDT) transducer) وهو يعمل على نفس مبدأ النوع الخطي إلا أن القلب الحديدي يتحرك بشكل دائري والملفات يتم لفها على

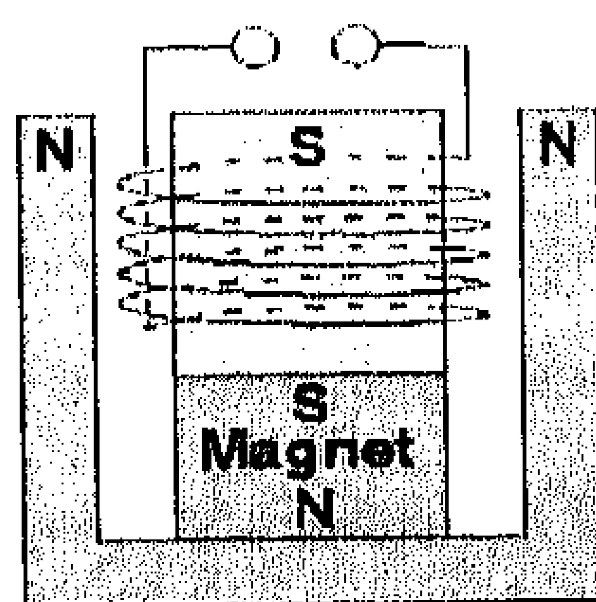


أنبوبة أسطوانية دائرية. وأما مصوغات المقاومة المتغيرة (potentiometric transducer) فيمكن استخدامها لقياس الإزاحة الخطية أو الإزاحة الزاوية أو الدورانية وذلك باستخدام مقاومة متغيرة تسمى البوتنشوميتر. والبوتونشوميتر هو عبارة عن مقاومة سلكية أو شريطية توضع على جسم أسطواني أو مسطح ويوجد لها ثلاثة أطراف إثنان منهما هما أطراف المقاومة بينما الطرف الثالث يتم ربطه بمنزلق (slider) يتحرك على طول المقاومة منتجا مقاومة متغيرة بين الطرف المتحرك وأحد الطرفين الثابتين. وتتناسب قيمة المقاومة المتغيرة مع المسافة بين الطرف المتحرك وأحد الأطراف الثابتة مما يؤهله ليكون مقياسا للإزاحة الخطية إذا كانت المقاومة ممدة بشكل طولي أو للإزاحة الزاوية إذا كانت المقاومة ممدة بشكل دائري.

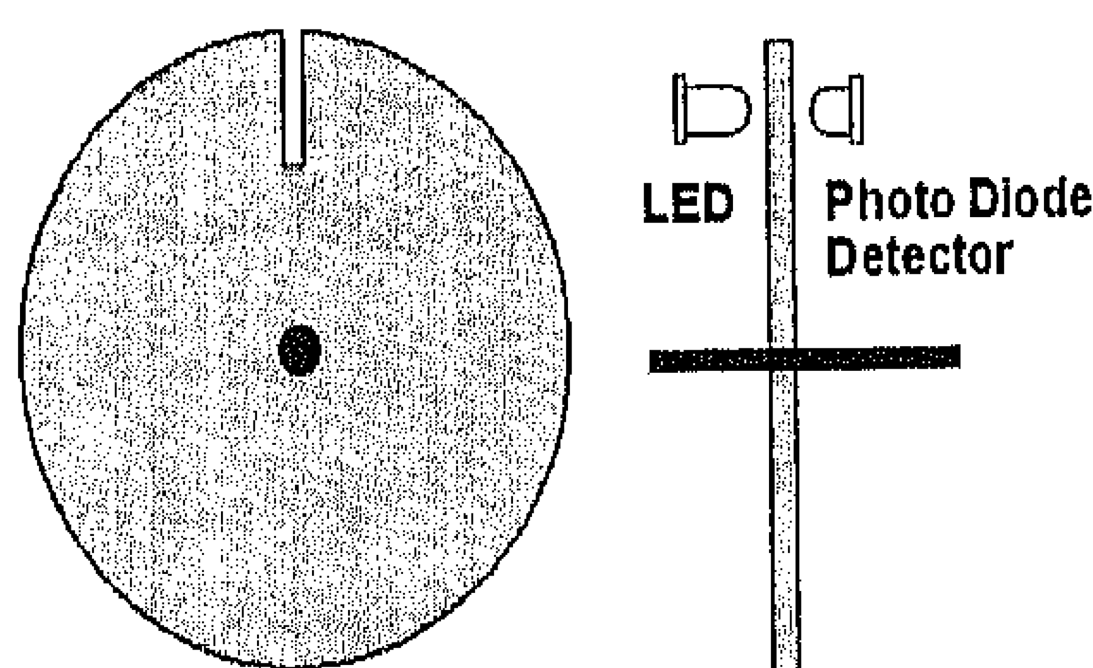




وتستخدم المصوغات الضوئية لقياس الإزاحة الخطية أو الإزاحة الزاوية حيث يوجد أنواع لا حصر لها من هذه المصوغات. ومن أهم المصوغات الضوئية المستخدمة لقياس موقع محور الدوران في مختلف أنواع المحركات المشفر الضوئي المطلق (Optical absolute encoders) والذي يتكون من قرص بلاستيكي شفاف يقسم سطحه إلى مسارات دائرية (tracks) والتي تقسم بدورها إلى قطاعات (sectors) بعضها معتم وبعضها شفاف يمكنه تمرير الضوء. ويتم اختيار القطاعات الواقعة تحت بعضها لتمثل عدد ثنائي (binary number) بعدد من البتات يساوي عدد المسارات بحيث يمثل القطاع الشفاف الرقم واحد والقطاع المعتم الرقم صفر في نظم العد الثنائي، ويثبت على أحد وجهي القرص باعث ضوئي (LED) يضيئ القطاعات الرأسية في كل مسار وعلى الوجه الآخر تثبت كاشفات ضوئية (photodiodes) بعدد المسارات والتي تنتج تيارات كهربائية فقط إذا كانت تواجهه المناطق الشفافة بسبب سقوط الضوء عليها أي أن مخارج الكاشفات تعطي الرقم الثنائي الذي يحدد موقع القرص المطلق عند أي لحظة زمنية.

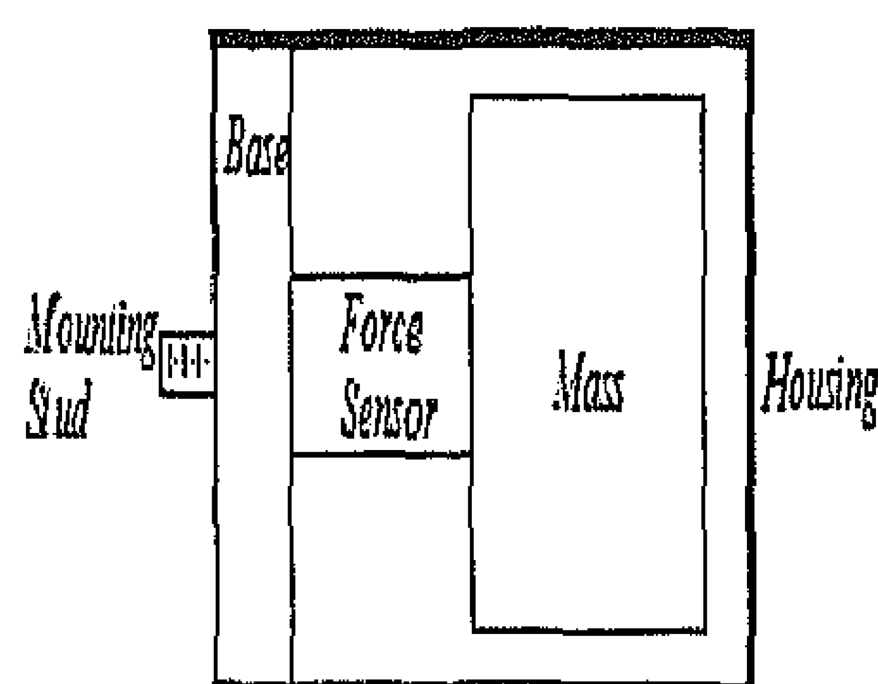


ويستخدم لقياس السرعة (velocitymeters or speedometer) أشكال مختلفة من المصوغات وذلك حسب طبيعة الجسم المراد قياس سرعة. فلقياس السرعات الخطية (linear velocity) للأجزاء المتحركة في الآلات الميكانيكية يستخدم المصوغ الكهروديناميكي (electrodynamic transducer) وهو عبارة عن ملف يتحرك بحرية حول قلب مغناطيسي ويتم ربط الملف بالجسم المتحرك مع تثبيت القلب المغناطيسي أو العكس. وعند تحرك الجسم بسرعة ما فإن حركة الملف المرتبط به بالنسبة للمغناطيس تولد جهدا كهربائيا بين أطرافه يتناسب مقدارها مع السرعة تبعا لقانون فرادي أو قانون الحث الذاتي. ولقياس السرعات الزاوية أو الدورانية (angular velocity) للمحركات الميكانيكية والكهربائية يستخدم مقياس السرعة الدورانية (tachometer) والذي يستخدم أنواع مختلفة من المصوغات من أبسطها المصوغ الضوئي حيث يتم تركيب



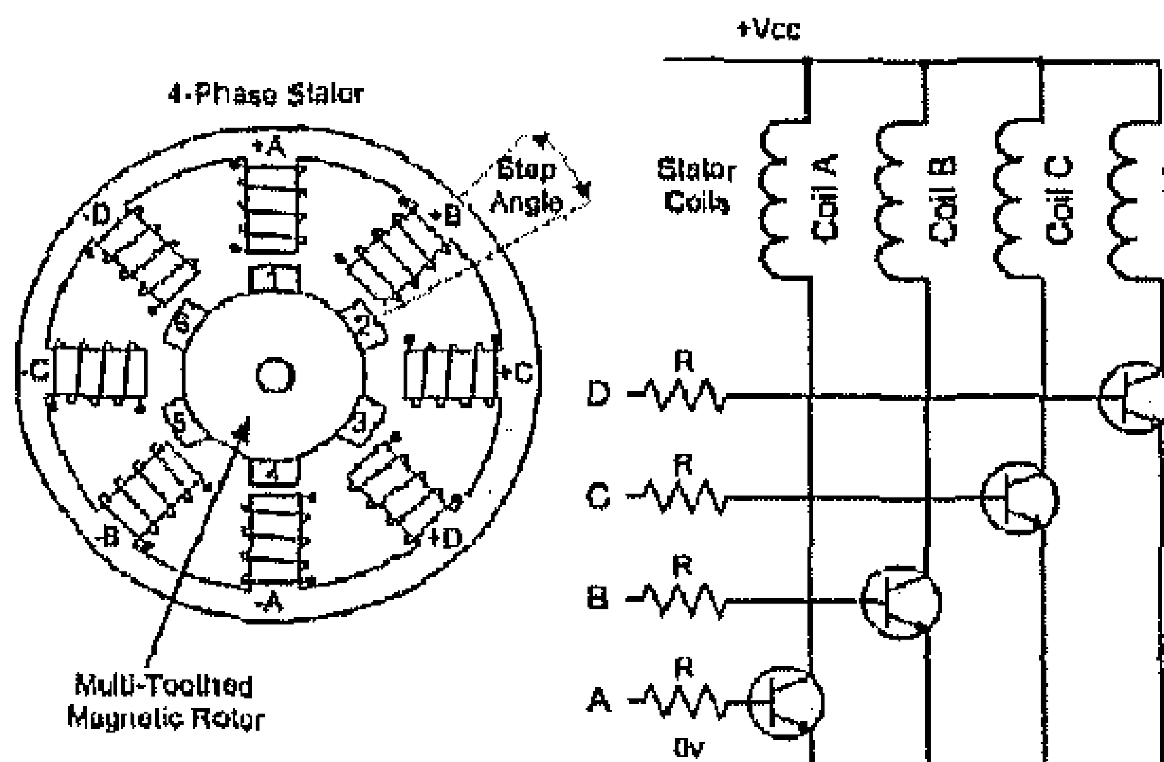
قرص بفتحة على المحور الدوار ومن ثم يتم وضع مصدر ضوئي على أحد وجهي القرص وكاشف ضـوئي في مقابله على الوجه الآخر وعند دوران القرص فإن الضوء يسقط على الكاشف عند مـرور الفتحـة بـين المصدر والكاشف فيولد نبضات كهربائية يتم عددها بعداد إلكتروني. ولقياس سرعة الأجسام المتحركـة فـي الهواء يتم استخدام مصوغات الضغط أما الأجسام المتحركة في الفراغ فيتم قياس سرعتها من خلال حسـاب التكامل للتسارع.

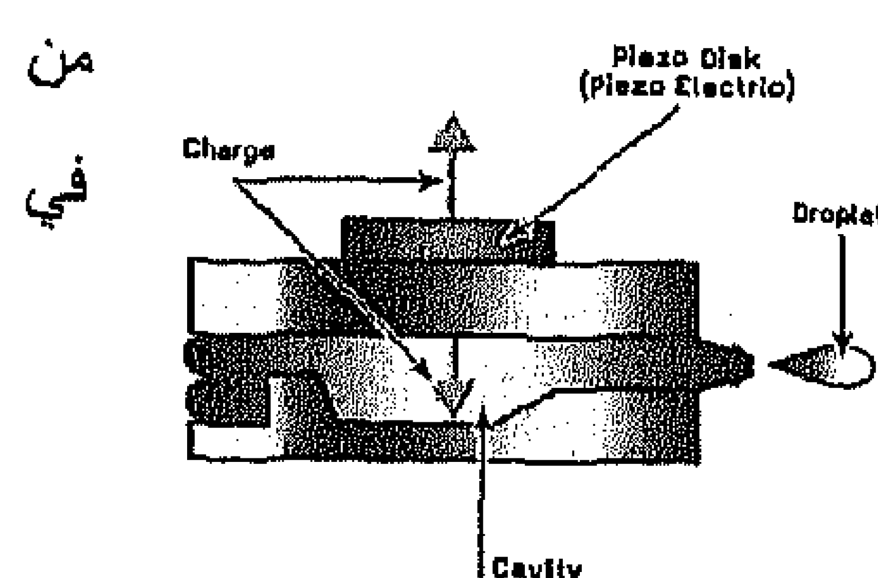
ويستخدم لقياس التسارع (Accelorometers) مصوغات القوة وذلك من خلال تعليق كتلة معينـة بطرف مقياس القوة فعندما تكون السرعة ثابتة لا توجد قوة مؤثرة على المقياس ولكن عندما يتسارع أو يتباطأ الجسم فإن الكتلة وبسبب القصـور الـذاتي (inertial resistance) تتحرك إلى الأمام في حالة التباطؤ وإلى الخلف في حالة التسارع محركة بـذلك ذراع مقيـاس القوة بمقدار يتناسب مع قيمة التسـارع سـواء كـان موجبا أو سالبا. ويعتمد مدى قيم التسارع ودقتها علـى نوع مقياس القوة المستخدم حيث تستخدم المصوغات الكهروضغطية (Piezoelectric transducers) لقياس قيم التسارع العالية كما في الطائرات والصواريخ. وعادة ما تصمم مقاييس التسارع لتقـيس التسـارع فـي الاتجاهات الثلاث وذلك من خلال ربط الكتلة بثلاثة من مصوغات القوة توضع باتجاهات متعامدة.



9-12 المثيرات (Actuators)

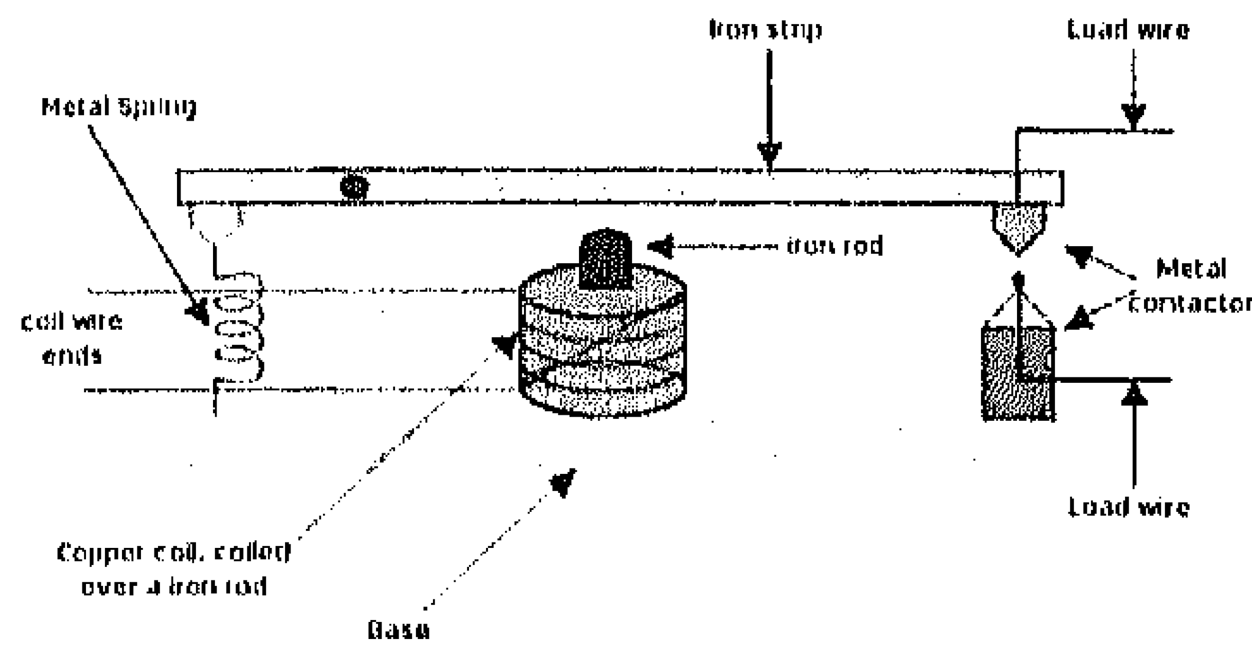
تعمل المثيرات (actuator) عكس عمل المصوغات (transducer) فهي تقوم بتحويل الإشـارات الكهربائية إلى مختلف أشكال الطاقة ويطلق عليها أحيانـا بمصوغات الخرج (output transducer). فالإشـارات الكهربائية يتم تحويلها إلى طاقـة ميكانيكيـة باسـتخدام المحركات الكهربائيـة وخاصـة المحركـات الخطويـة (stepper motors) أو باستخدام المـرحلات (relays). فالمحركات الخطوية تستخدم لتحريك محاور الآلات بشكل متقطع وعلى شكل خطوات أو قفزات تكون فيها الخطـوة أقل بكثير من الدورة الكاملة . ويتكون المحرك الخطوي من عضو ساكن بعدد معين من الملفات ومن عضـو متحرك قد يحتوي على عدد من المغناطيسات الدائمة أو بقلب حديدي مسنن بدون مغناطيسات. ويمكن تحريك المحرك على شكل خطوات من خلال تغذية ملفات العضو الساكم بنبضات كهربائية بترتيب معين بحيث يغذى ملف واحد فقط من هذه الملفات في الوقت الواحد وغالبا ما يتم هـذا من خلال المتحكمات الرقمية والحواسيب. وتستخدم مثل هذه المحركـات في معظم خطوط الإنتاج في المصانع وفـي مشـغلات الأقـراص فـي الحواسيب والرادارات وأنظمـة التوجيـه وغيرهـا الكثيـر. أمـا المرحلات (relays) فتستخدم كمفتـاح ميكـانيكي (mechanical switch) يتم التحكم به بجهد كهربائي قليل وتستخدم مثل هذه المفاتيح الميكانيكية المحكومة كهربائيا في فـتح





وإغلاق الدوائر الكهربائية التي تمرر تيـــارات كهربائيـــة عاليـــة لا يمكـــن للترانزستورات والثايرستورات (Thyristors) تحملها. ويتكون المرحل من معناطيس كهربائي يقوم عند تمرير التيــار فيــه بســحب ذراع حديدي تعمل على فتح أو إغلاق المفتاح الميكانيكي.

ويتم تحويل الإشارات الكهربائية إلى إشارات ضوئية من خلال الثنائيات الباعثـــة للضـــوء (Light Emitting Diodes) والليزرات (Lazers) والشاشات البلوريـــة الســـائلة (Liquid Crystal Displays) وأنبوب الأشعة المهبطية (Cathode Ray Tube) والتي شرحناها في الفصـــول الســـابقة. ويـــتم تحويـــل الكهرباء إلى طاقة حرارية من خلال تمرير التيار في المقاومات الكهربائية والتي تنتج طاقة حرارية تتناسب مع حاصل ضرب المقاومة في مربع قيمة التيار. ويتم تحويل الإشارات الكهربائية إلى ضغط في الهـــواء أو الماء مـــن خـــلال تحريـــك أغشـــية (Diaphragm) مرتبطة بمغناطيسات كهربائية أوباستخدام البلـــورات الكهروضغطية (piezoelectric crystals) كما فـــي الســـماعات والطابعـــات النافثـــة للحبـــر (Inkjet printers). وتستخدم الهوائيات (antennas) لتحويل التيارات الكهربائية إلى موجات كهرومغناطيسية تنتشر في الفضاء وبترددات تغطي كامل الطيف الراديوي بينما تستخدم البلـــورات الكهروضـــغطية فـــي توليـــد الموجات فوق الصوتية (ultrasound).



المراجع

1- التقانات اللاسلكية – تقرير خاص، مجلة العلوم، المجلة 14، العدد 11، 1998م، مؤسسة الكويت للتقدم العلمي.

2- المواد للمعلومات والاتصالات (ج. س. مايو)، مجلة العلوم، المجلة 3، العدد 4، 1987م، مؤسسة الكويت للتقدم العلمي.

3- ثورة المعلومات (مقال مترجم)، آفاق علمية، آذار-نيسان 1986م، مؤسسة عبدالحميد شـومان- الأردن.

4- ثورة التلفزيون الرقمي (مقال مترجم)، آفاق علمية، آيار-حزيران 1989م، مؤسسة عبدالحميـد شومان- الأردن.

5- أنظمة الاتصالات الضوئية، منصور العبادي، آفاق علمية، كانون ثاني-شباط 1986م، مؤسسـة عبدالحميد شومان- الأردن.

-6 www.electricityforum.com/a-timeline-o...

-7 www.earlyelectric.com/timeline.html

-8 hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/e...

-9 www.sciencedaily.com/articles/e/elect...

-10 en.wikipedia.org/wiki/Electric_motor

-11 inventors.about.com/library/inventors...

-12 en.wikipedia.org/wiki/Electrical_powe...

-13 en.wikipedia.org/wiki/Electricity

-14 wapedia.mobi/en/Electricity_generation

-15 www.computerhistory.org/timeline

-16 en.wikipedia.org/wiki/Computer

-17 en.wikipedia.org/wiki/History_of_comm

-18 en.wikipedia.org/wiki/History_of_tele

-19 en.wikipedia.org/wiki/History_of_radio

-20 en.wikipedia.org/wiki/History_of_radar

-21 en.wikipedia.org/wiki/Laser

-22 en.wikipedia.org/wiki/Satellite

-23 en.wikipedia.org/wiki/Measurement

هذا الكتاب

"هذا الكتاب قد كتب بطريقة بحيث يستفيد منه قراء بمستويات مختلفة من التعليم وعلى مختلف تخصصاتهم فالتمهيد الموجود في بداية كل فصل من فصول هذا الكتاب يعطي تعريفا عاما عن مختلف تخصصات الهندسة الكهربائية ويمكن لأي قارئ أن يستفيد منه. وأما المستوى الثاني من القراء فهم المختصون في غير الهندسة الكهربائية وخاصة المهندسون منهم والذين في الغالب يدرسون مساقا واحدا أو مساقين في أساسيات الهندسة الكهربائية وسيساعدهم هذا الكتاب في التعرف على مختلف تخصصات الهندسة الكهربائية. أما المهندسون الكهربائيون فإن هذا الكتاب سيساعدهم على التعرف على كثير من جوانب الهندسة الكهربائية التي لم يتمكنوا من دراستها من خلال المساقات الدراسية فالمساقات المتقدمة في تخصصات الاتصالات والإلكترونيات والحاسوب والقوى والآلات لا يدرسها إلا من تخصص في أحد هذه التخصصات. بل إن المهندس الكهربائي الذي تخصص في أحد هذه التخصصات قد لا يتمكن من دراسة بعض المساقات المتقدمة في تخصصه فالمختصون في هندسة الاتصالات قد لا يتمكنوا من دراسة مساق عن الأقمار الصناعية أو عن الرادار أو عن الليزر. وقد يساعد هذه الكتاب مدرسي الهندسة الكهربائية في إعطاء الطلاب مقدمة عامة عن المساق الذي يدرسونه يشرحون فيها تاريخ تطور مختلف علوم الهندسة الكهربائية وأسماء العلماء الذين لعبوا دورا في تطورها ونبذة قصيرة عن بعض جوانب المادة المتعلقة بالمساق والتي لا يمكنهم تغطيتها من خلال الخطة الدراسية."



email : mabbadi@just.edu.jo
blog : mansourabbadi.maktoobblog.com
Mobile : + 962 79 55 74 238